

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2024

**JAKUB
POLÁČEK**



ČVUT

ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

**ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A
METROLOGIE**

Tvrdé soustružení

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR: Jakub Poláček

VEDOUcí PRÁCE: Ing. Zdeněk Pitrmuc, Ph.D.

STUDIJNÍ PROGRAM: B 2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství

STUDIJNÍ OBOR: 2303R014 Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Praha 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Poláček** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **501242**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Tvrdé soustružení

Název bakalářské práce anglicky:

Hard part turning

Pokyny pro vypracování:

- 1) Soustružení - kinematika, nástroje, technologické možnosti
- 2) Tvrdé soustružení - specifika, řezné materiály, požadavky na stroje
- 3) Analýza řezného procesu z pohledu dynamiky řezání
- 4) Integrita povrchu po tvrdém soustružení

Seznam doporučené literatury:

DAVIM, J. P., ed. Modern machining technology: a practical guide. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. Woodhead Publishing in mechanical engineering. ISBN 978-0-85709-099-7.
katalogy výrobců nástrojů

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Zdeněk Pitrmuc, Ph.D. ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **08.04.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **05.08.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Zdeněk Pitrmuc, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

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

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Zdeňka Pitrmuce, Ph.D., a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Mé poděkování patří především vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Zdeňkovi Pitrmucovi, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady, poskytnutí konzultací a podporu při realizaci experimentu.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou tvrdého soustružení. V rešeršní části je popsána samotná technologie soustružení a její specifická oblast tvrdého soustružení. V této části se také nachází charakteristika používaných řezných materiálů. Dále je v práci řešena integrita povrchu po tvrdém soustružení včetně faktorů, které ji ovlivňují. Experimentální část je věnována analýze řezných sil a dosažené integrity povrchu při obrábění kalených součástí z oceli C45E.

Název diplomové práce:	Tvrdé soustružení
Autor práce:	Jakub Poláček
Vedoucí práce:	Ing. Zdeněk Pitrmuc, Ph.D.
Akademický rok:	2023/2024
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12134 Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí ústavu:	Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Rozsah práce:	79 stránek, 20 tabulek, 47 obrázků, 4 grafy
Klíčová slova:	tvrdé soustružení, řezné materiály, vyměnitelné břitové destičky, řezné podmínky, řezná rychlost, řezné síly, integrita povrchu, ocel C45E, kalená ocel

Annotation

This bachelor's thesis focuses on the hard turning. The research part describes general turning technology and its specific area of hard turning. This part also describes the characteristics of the cutting materials which are used. Furthermore, the thesis examines the integrity of the surface after hard turning, including the factors that influence it. The experimental part is devoted to the analysis of cutting forces and achieved surface integrity during machining of hardened parts made of C45E steel.

Title of the final thesis:	Hard part turning
Author:	Jakub Poláček
Supervisor:	Ing. Zdeněk Pitrmuc, Ph.D.
Academic year:	2023/2024
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12134 - Department of Machining Technology, Process Planning and Metrology
Head of department:	Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Extent:	79 pages, 20 tables, 47 pictures, 4 charts
Keywords:	hard turning, cutting materials, turning inserts, cutting conditions, cutting speed, cutting forces, surface integrity, C45E steel, hardened steel

Obsah

1. ÚVOD A CÍL PRÁCE	11
2. SOUSTRUŽENÍ	12
2.1 Kinematika	12
2.2 Řezné síly při soustružení	14
2.3 Nástroje.....	16
3. TVRDÉ SOUSTRUŽENÍ.....	20
3.1 Využití tvrdého soustružení místo procesu broušení.....	20
3.2 Soustružené materiály	20
3.3 Řezné materiály.....	22
3.3.1 CBN/PCBN	23
3.3.2 Keramika.....	23
3.3.3 Slinutý karbid	24
3.4 Řezná prostředí.....	25
3.5 Nástroje pro tvrdé soustružení.....	26
3.6 Požadavky na stroje.....	28
3.7 Doporučení pro tvrdé soustružení	29
4. INTEGRITA POVRCHU PO TVRDÉM SOUSTRUŽENÍ	32
4.1 Parametry drsnosti povrchu	32
4.1.1 Průměrná aritmetická a kvadratická hodnota drsnosti (R_a , R_q)	33
4.1.2 Hloubka drsnosti (R_z , R_{max}).....	34
4.2 Mikrotvrdost	35
4.3 Vliv parametrů tvrdého soustružení na integritu povrchu.....	36
5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	37
5.1 Příprava součástí.....	37

5.1.1	Materiál.....	37
5.1.2	Obrábění v měkkém stavu	39
5.1.3	Kalení.....	42
6.	ANALÝZA INTEGRITY POVRCHU PO TVRDÉM SOUSTRUŽENÍ V ZÁVISLOSTI NA ŘEZNÉ RYCHLOSTI.....	45
6.1	Strategie a průběh obrábění	47
6.2	Měření drsnosti povrchu	50
6.3	Příprava metalografických výbrusů	51
6.4	Měření mikrotvrdosti povrchové vrstvy	52
6.5	Naměřené hodnoty a vyhodnocení.....	54
6.5.1	Drsnost povrchu	54
6.5.2	Mikrotvrdost	56
6.6	Metalografie.....	59
7.	ANALÝZA ŘEZNÝCH SIL PŘI TVRDÉM SOUSTRUŽENÍ V ZÁVISLOSTI NA ŘEZNÉ RYCHLOSTI	62
7.1	Měření řezných sil	62
7.2	Naměřené hodnoty a vyhodnocení.....	64
8.	ZÁVĚR.....	67
	Reference	69
	Seznam tabulek.....	74
	Seznam obrázků	74
	Seznam grafů.....	75
	Seznam příloh.....	76

Seznam použitých symbolů a zkratek

a_p	[mm]	hloubka řezu
CBN	[-]	cubic boron nitride (kubický nitrid boru)
CVD	[-]	chemical vapor deposition (chemická depozice z plynné fáze)
F	[N]	zkušební zatížení
f	[mm/ot.]	posuv nástroje
F_c	[N]	tangenciální řezná síla
F_f	[N]	posuvová axiální síla
F_p	[N]	radiální pasivní síla
F_x	[N]	síla působící v ose x
F_y	[N]	síla působící v osy y
F_z	[N]	síla působící v ose z
HRC	[-]	hodnota tvrdosti dle Rockwella
HV	[-]	hodnota tvrdosti dle Vickerse
k_c	[N·mm ⁻²]	měrná řezná síla
L_c	[mm]	vlnová délka pro filtraci vlnitosti
L_s	[μ m]	vlnová délka pro filtraci chvění
L_t	[mm]	snímaná délka
MQL	[-]	minimum quantity lubrication (minimální množství mazání)
n	[min ⁻¹]	otáčky obrobku
P_c	[W]	řezný výkon
PCBN	[-]	polykrystalický CBN
PCD	[-]	polykrystalický diamant
PVD	[-]	physical vapor deposition (fyzikální depozice z plynné fáze)
R	[N]	výslednice řezných sil
R_a	[μ m]	průměrná aritmetická hodnota drsnosti
R_{max}	[μ m]	největší hodnota hloubky drsnosti
R_q	[μ m]	průměrná kvadratická hodnota drsnosti
R_v	[μ m]	hloubka nejnižší prohlubně v profilu drsnosti
R_z	[μ m]	průměrná aritmetická hodnota z hloubek drsnosti
VBD	[-]	vyměnitelná břitová destička
v_c	[m·min ⁻¹]	řezná rychlost
v_f	[mm·min ⁻¹]	rychlost posuvu
V_t	[mm/s]	rychlost měření
σ	[N]	směrodatná odchylka pro naměřené síly

1. ÚVOD A CÍL PRÁCE

Tvrdé soustružení má velké zastoupení v běžné strojírenské praxi. Na namáhané strojní součásti jsou kladeny nejvyšší možné požadavky související s mechanickými vlastnostmi materiálů a přesností výroby. Pro vyhovění těchto požadavků se využívá široká škála tvrzených materiálů, které vyžadují specifický přístup k obrábění. Mezi běžně využívané materiály patří různé druhy tvrzených ocelí, které disponují výbornými vlastnostmi jako vysoká pevnost, tvrdost, houževnatost, otěruvzdornost a další. Jejich obrábění bylo možné až s příchodem dostatečně tvrdých a odolných řezných materiálů. Do té doby existovala pouze jediná varianta, a to technologie broušení.

Tato bakalářská práce obsahuje rešeršní a experimentální část. Rešeršní část uvádí čtenáře do problematiky tvrdého soustružení a objasňuje stěžejní pojmy. Hlavním obsahem první části jsou témata zabývající se zejména obecným soustružením, tvrdým soustružením, dosahovanou integritou povrchu a detailním popisem používaných řezných materiálů.

Cílem experimentální části je analyzovat průběh a výsledky tvrdého soustružení v závislosti na nastavení řezné rychlosti. Stěžejní bod realizace experimentu představuje obrobení dílů, u kterých bylo provedeno vlastní tepelné zpracování. Vyhodnocenými daty jsou dosažená drsnost povrchu, mikrotvrdost v povrchové vrstvě, metalografické snímky a analýza řezných sil.

Poznatky bakalářské práce mohou sloužit k optimalizaci řezných podmínek při tomto typu obrábění.

2. SOUSTRUŽENÍ

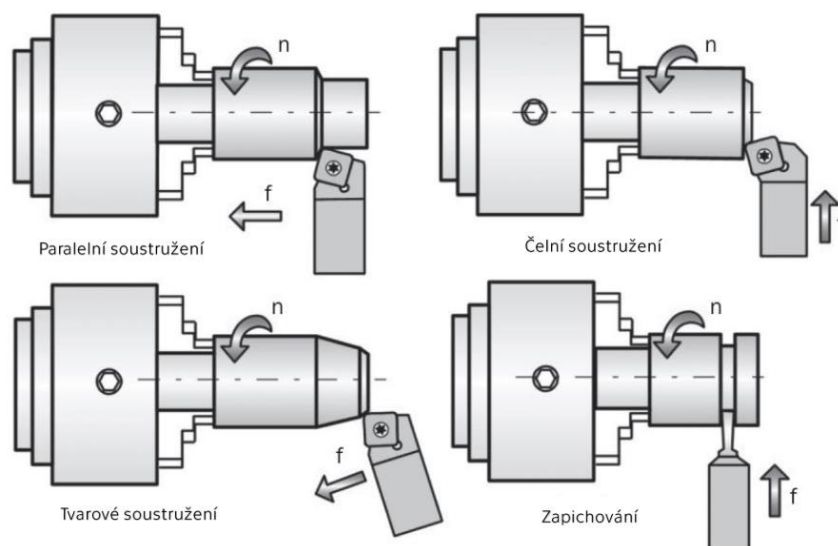
Soustružení patří mezi nejpoužívanější metody třískového obrábění ve strojírenské praxi. Obrábění je technologie, při které dochází k úběru materiálu součásti. Pro dosažení tvarových, rozměrových a kvalitativních požadavků jsou operace obrábění rozděleny na hrubovací, na čisto a dokončovací. Pomocí technologie soustružení se vyrábí rotační plochy, které se na strojních součástech vyskytují nejčastěji. [1]

2.1 Kinematika

Při procesu soustružení dochází k relativnímu pohybu mezi nástrojem a obrobkem. Tento relativní pohyb je součástí většiny obráběcích operací. Skládá se z několika dílčích elementárních pohybů. Primárním relativním pohybem je řezná rychlost. Sekundární pohyb se nazývá řezný posuv. Tyto základní pohyby, v kombinaci s nástrojem a jeho geometrií, vytváří obrobený povrch. [2]

Hlavní rotační pohyb (n) koná obrobek kolem své rotační osy. Vedlejším pohybem je posuvový pohyb (f) nástroje, podle kterého jsou charakterizovány běžné operace soustružení. Tyto operace se dělí podle směru posuvu nástroje k ose otáčení: [2]

- Paralelní/podélné soustružení
- Čelní soustružení
- Zapichování
- Tvarové soustružení



Obrázek 1 - Běžné operace soustružení [2]

Řezné podmínky charakterizují řezný proces. Vycházejí z kinematické soustavy a základních pohybů. Mezi veličiny řezných podmínek patří řezná rychlost (v_c), rychlost posuvu (v_f) a hloubka řezu (a_p). Řezná rychlost je definována jako rychlost, kterou povrch obrobku prochází břitem. Rychlost posuvu vyjadřuje vzdálenost, o jakou se řezný nástroj posouvá na jednu otáčku. Hloubka řezu udává tloušťku odřezávané vrstvy z povrchu obrobku při jednom záběru nástroje. [2]

Výpočty řezných podmínek: [2]

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

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} [\text{min}^{-1}] \quad (2.2)$$

$$v_f = f \cdot n [mm \cdot \text{min}^{-1}] \quad (2.3)$$

$$a_p = \frac{D - D_{obr}}{2} [mm] \quad (2.4)$$

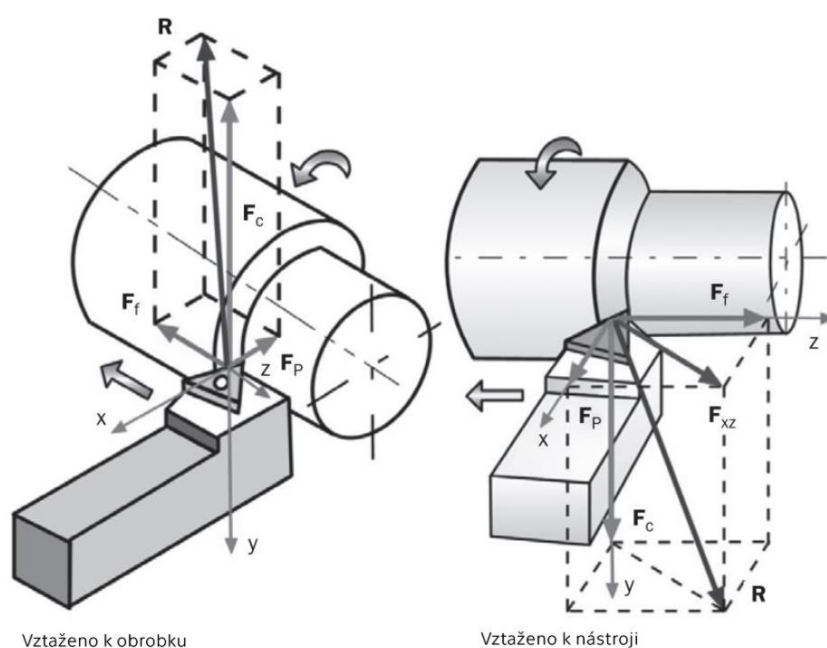
Kde: D – průměr součásti [mm], n – otáčky obrobku [min^{-1}], f – posuv nástroje [mm], D_{obr} – obrobený průměr součásti po jednom přejetí nástroje [mm]

2.2 Řezné síly při soustružení

Ke vzniku řezných sil dochází v místě řezu, kde přichází do kontaktu nástroj s povrchem obrobku. Řezná hrana nástroje je vtlačována do obrobku, čímž dochází k deformaci a oddělení materiálu ve formě třísky. Znalost řezných sil je důležitým faktorem při posuzování obrábitelnosti materiálu. [3]

Výslednou řeznou sílu, potřebnou pro překonání řezného odporu materiálu, lze rozložit do tří složek, které působí v osách kartézské soustavy souřadnic. Hlavní složkou je tangenciální řezná síla (F_c) působící ve směru hlavního řezného pohybu. Jedná se o největší složku síly, podle které jsou voleny řezné podmínky. Ve směru posuvu nástroje působí posuvová axiální síla (F_f). Kolmo k ose obrábění působí radiální pasivní síla (F_p). Řezné síly působí na obrobek i nástroj současně. [2]

Významnou složkou síly při zkoumání přesnosti obrábění je také výsledná síla v rovině x-z, je-li uvažována osa y jako směr hlavního řezného posuvu. [2]



Obrázek 2 - Řezné síly [2]

Výsledná řezná síla (R) je výslednicí všech dílčích složek sil:

$$R = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \text{ [N]} \quad (2.5)$$

Velikosti řezných sil přímo souvisí s velikostí spotřebované energie během soustružení. Vysoké řezné síly vyžadují vysoký výkon stroje. Při působení velkých řezných sil dochází k větším deformacím nástroje. Jsou-li řezné síly příliš vysoké, ovlivňují negativně proces soustružení z hlediska vibrací a životnosti nástroje. [3]

Pro výpočet řezného výkonu při soustružení běžných dobře obrobitelných materiálů je uvažována pouze největší složka F_c působící ve směru řezné rychlosti. Ostatní složky jsou pro výpočet řezného výkonu zanedbatelně malé. [2]

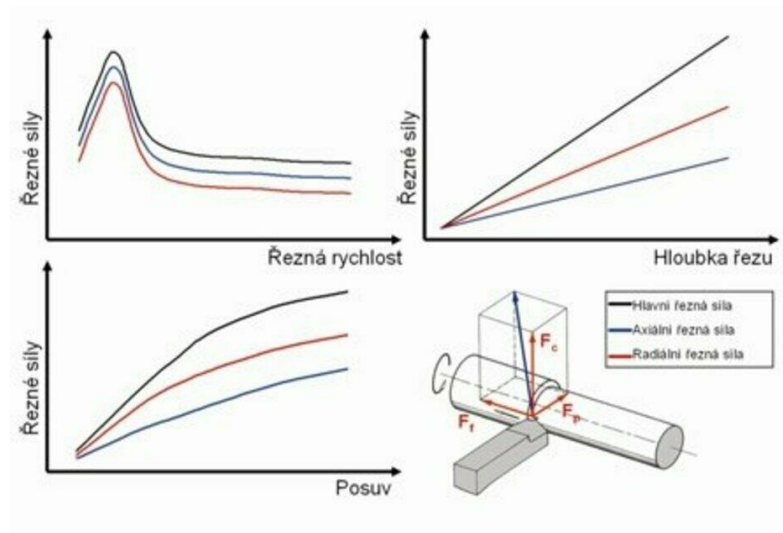
Výpočet řezného výkonu (P_c): [2]

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60} \text{ [W]} \quad (2.6)$$

Kde: F_c – řezná síla [N], v_c – řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]

Nastavení řezných podmínek, materiál obrobku a geometrie nástroje ovlivňují velikost generovaných řezných sil. Platí, že čím je tvrdost obráběného materiálu vyšší, tím budou větší řezné síly z důvodu většího řezného odporu. Nižší síly budou generovány v případě ostré řezné hrany nástroje. Ostrost řezné hrany definuje především úhel čela nástroje. [3]

Hlavní ovlivňující faktor z řezných podmínek představuje hloubka řezu. Vliv má také posuv nástroje, avšak není tak podstatný jako u hloubky řezu. Naopak řezná rychlost má zanedbatelný vliv, je-li volena ve správném rozmezí. [3][4]



Obrázek 3 – Vliv řezných podmínek na velikost řezných sil [3]

Další důležitou silovou charakteristikou je měrná řezná síla, která představuje řeznou sílu na jednotku plochy řezu. Plocha řezu neboli průřez odřezávané vrstvy může být dán součinem posuvu a hloubky řezu. Velikost měrné řezné síly je závislá na typu obráběného materiálu a řezných podmínkách. Nejvýznamnější vliv na změnu měrné řezné síly má posuv nástroje, který souvisí s tloušťkou odřezávané vrstvy. [1]

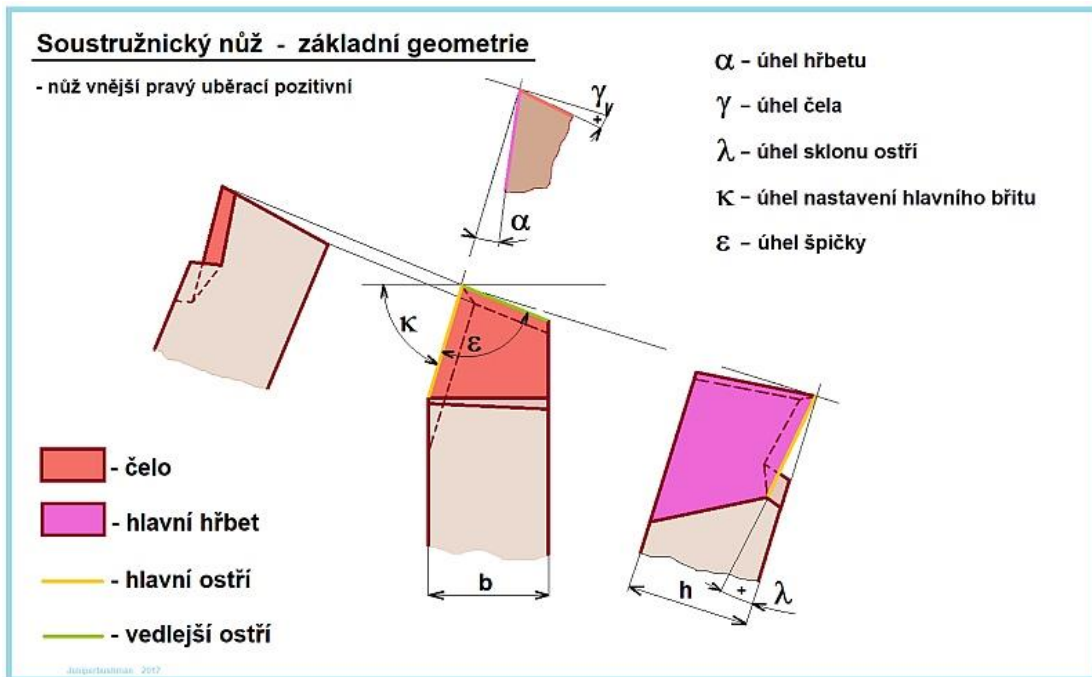
Výpočet měrné řezné síly (k_c): [1]

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} [N \cdot mm^{-2}] \quad (2.7)$$

Kde: F_c – řezná síla [N], A_D – plocha řezu [mm^2]

2.3 Nástroje

Typickým nástrojem využívaným při soustružení je soustružnický nůž. Druhy soustružnických nožů můžeme rozlišovat podle druhu materiálu, konstrukce nebo geometrického tvaru. Dle konstrukčního provedení se soustružnické nože dělí na nože monolitní, nože s pájenou destičkou a nože s vyměnitelnou břitovou destičkou (VBD). [5]



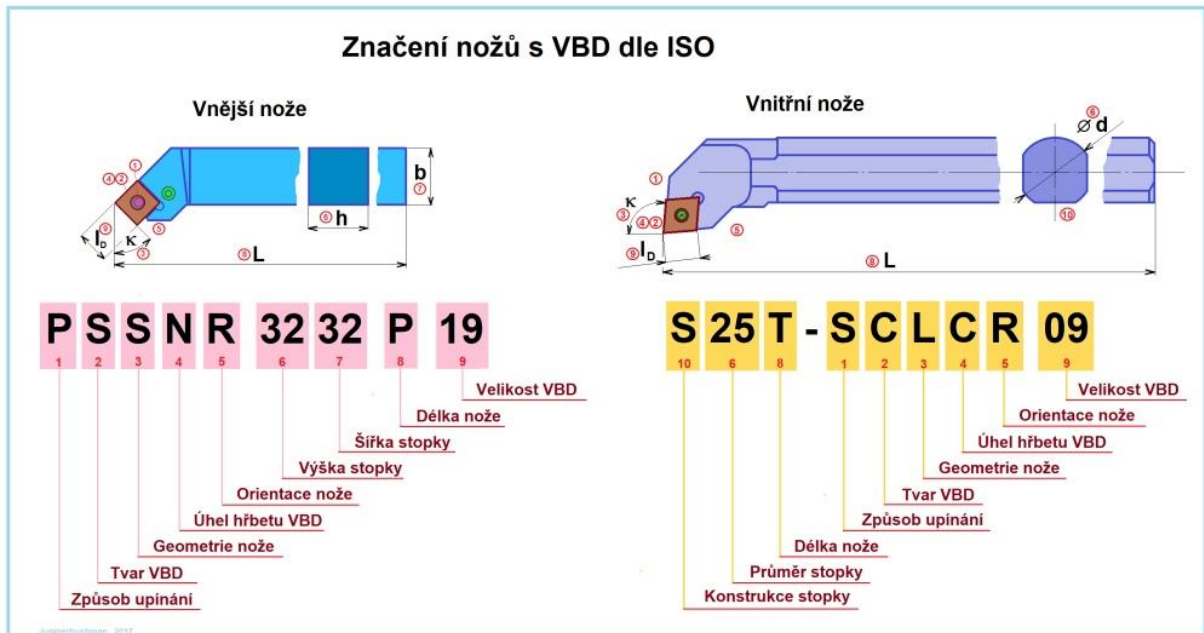
Obrázek 4 – Základní geometrie soustružnického nože [6]

V současné době jednoznačně převažuje využití koncepce VBD. V této práci bude dále uvažováno pouze soustružení pomocí nástrojů s VBD, jelikož jsou pro tvrdé soustružení nepostradatelnou součástí.

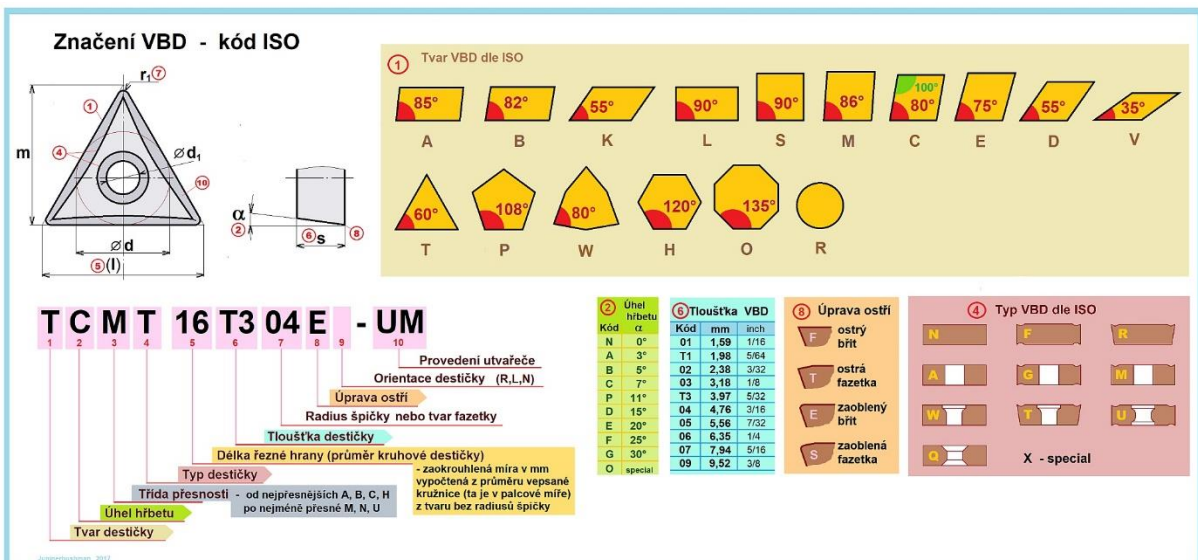
Nástroje pro soustružení s VBD se skládají ze samotného těla nástroje a konkrétní specifické vyměnitelné břitové destičky. Typ VBD je zvolen vždy na základě specifikací daného obrobku. Nástroje s VBD se rozdělují na dvě skupiny dle způsobu provedení řezné hrany. K dispozici máme nástroje s plnými destičkami nebo nástroje s pájenou vlastní řeznou destičkou z požadovaných materiálů, která charakterizuje řeznou hranu. Vlastní řezné destičky se pájí do sedel VBD a jsou při výrobě broušeny na extrémně přesných bruskách, pomocí kterých lze dosáhnout přesnosti až na 1 μm . [7][8]

Soustružnické nože s VBD i samotné břitové destičky se normují a nesou ISO označení. Značení ISO popisuje základní geometrie. Součástí značení je například i třída přesnosti nebo způsob upínání VBD.

Způsob značení:



Obrázek 5 - Značení nožů s VBD dle ISO [9]



Obrázek 6 - Značení VBD - kód ISO [10]

Geometrie soustružnických břitových destiček má přímý vliv na vlastnosti a parametry obrábění. Základní geometrie VBD lze rozdělit na tři základní typy, které jsou optimalizované pro operace dokončovací, střední a hrubovací. [11]

Každá operace soustružení vyžaduje určitý tvarovaný nástroj se svojí specifickou geometrií. Pro správné použití nástroje musí být jeho upínací část (stopka) kompatibilní s upínacím systémem stroje. Aby bylo technologicky možné provést danou operaci, je nutné volit také vhodný držák nástroje. Nástroje se mohou dělit například podle jejich druhu využití: [12]

- Soustružení vnějších ploch
- Soustružení vnitřních ploch
- Těžké soustružení
- Víceúčelové soustružení
- Upichování a zapichování
- Výroba závitů
- Vyvrtávání a vystružování

Problematika nástrojů pro soustružení je velice komplexní téma. Každý výrobce nástrojů má snahu přijít na trh s inovativním řešením. Mezi přední výrobce nástrojů například patří:

- Sandvik Coromant
- Dormer Pramet
- Iscar
- Seco
- Tungaloy

3. TVRDÉ SOUSTRUŽENÍ

Tvrdé soustružení lze charakterizovat jako soustružení tvrdých materiálů s tvrdostí v rozmezí 45-68 HRC. Tvrdé soustružení začalo s vývojem velmi tvrdých řezných materiálů postupně nahrazovat, dříve více používaný, proces broušení. Soustružení takto tvrdých materiálů je doprovázeno působením velkých řezných sil, které generují velké množství tepla, což proces soustružení významně komplikuje. [13][14]

3.1 Využití tvrdého soustružení místo procesu broušení

Vývoj nových a podstatně odolnějších řezných materiálů přinesl nový pohled na problematiku obrábění tvrdých materiálů. V řadě aplikací lze využívat tvrdé soustružení místo broušení pro dosažení lepší kvality obrobeneho povrchu při značně vyšší rychlosti úběru materiálu. Ačkoliv se při tvrdém soustružení pracuje s malými posuvy a hloubkami řezu, odhaduje se zkrácení doby obrábění až o 60 % v porovnání s broušením. Zkrácení doby obrábění vede i k lepším ekonomickým výsledkům. [13]

Při správné kombinaci nastavení řezného procesu, jako poloměr špičky nástroje, posuv, hloubka řezu atd., vykazuje tvrdé soustružení lepší kvalitu povrchu. Výhodou je také možnost obrábění tvarově složitějších ploch, díky které není nutné používat speciálně tvarovaný nástroj. Při soustružení nemusí tak často docházet k přeupínání obrobku, což zaručuje vyšší přesnost. [13]

3.2 Soustružené materiály

Ve strojírenství se v dnešní době obrábí velmi široké spektrum materiálů. Každý z materiálů má své specifické vlastnosti, které ovlivňují jejich obrobiteľnosť. Pro snadnější přehled dělíme materiály do šesti hlavních skupin. Toto rozdělení je praktické především při volbě geometrie a třídy obráběcího nástroje a řezných podmínek. [15]

ISO rozdělení materiálů: [15]

- ISO P – nelegované až vysokolegované oceli, oceli na odlitky
- ISO M – korozivzdorné oceli s přísadou minimálně 12 % chromu
- ISO K – litiny
- ISO N – neželezné kovy
- ISO S – žáruvzdorné slitiny
- ISO H – tvrzené oceli s tvrdostí 45-65 HRC, tvrzené litiny
- O (Ostatní): Neobsažené v ISO – termoplasty, vyztužené polymery/plasty, kompozity, pryže a další

Mezi obráběné materiály, které by se dali považovat jako obrobky tvrdého soustružení, patří kalené legované oceli, nástrojové oceli, chromem pokryté oceli, cementované nebo nitridované oceli, tepelně zpracované produkty práškové metalurgie a další. Tyto tvrzené oceli nesou normované značení ISO H, kam spadají také tvrzené litiny. [14][15]

Skupiny rozdělení materiálů dle ISO se ještě běžně dělí do dílčích podskupin pro detailnější přehled. Výrobce nástrojů Dormer Pramet dále rozděluje skupiny ISO rozdělení do podskupin dle struktury materiálů a následně dle jejich tvrdostí.

Tabulka 1 – Rozdělení skupiny ISO H materiálů podle katalogu nástrojů Dormer Pramet [16]

H	H1	H1.1	Tvrzená litina	< 440 HB
	H2	H2.1	Kalená litina	< 55 HRC
		H2.2		> 55 HRC
	H3	H3.1	Kalená ocel s tvrdostí < 55 HRC	< 51 HRC
		H3.2		51-55 HRC
	H4	H4.1	Kalená ocel s tvrdostí > 55 HRC	55-59 HRC
		H4.2		> 59 HRC

Ačkoliv se tvrdost materiálů pohybuje již od 45 HRC, nejčastěji se tvrdě obrábí materiály s tvrdostí až 58-68 HRC. Tvrdost není jediným faktorem, ke kterému je nutné přihlížet. Například u kalených ocelí se volí přístup k obrábění i v závislosti na míře a hloubce prokalení. [17]

Většina aplikací tvrdého obrábění zahrnuje výrobu dílů s vysokými požadavky na pevnost, tvrdost a odolnost proti opotřebení. Takovými produkty mohou být ozubená kola, ložiska, hřídele a popřípadě různá řada nástrojů a konstrukčních dílů. [18]

3.3 Řezné materiály

Vysoké teploty a působení velkých sil při tomto typu obrábění značně limitují výběr řezných materiálů. S rostoucí tvrdostí obráběného materiálu se stává volba řezného materiálu podstatnějším. Pro tvrdé obrábění nejsou vhodné běžné nástrojové oceli pro jejich nízkou teplotní odolnost. Značné omezení mají také karbidové nástroje, které při obrábění materiálů s tvrdostí nad 55 HRC ztrácí teplotní a chemickou stabilitu, ovšem i přes známá omezení jsou v různých aplikacích karbidové nástroje používány. Nejlepšími materiály pro odolání takto náročných řezných podmínek jsou kubický nitrid bóru (CBN) a řezná keramika. Vyznačují se vysokou tvrdostí a odolností proti opotřebení za vysokých teplot. Jejich tvrdost a chemická stabilita jim umožňuje odolávat náročným tepelným podmínkám a mechanickému zatížení při tvrdém obrábění. [14][19][20]

Ačkoliv má CBN i řezná keramika vyhovující řezné vlastnosti, lze mezi nimi definovat určité rozdíly. Řezná keramika vykazuje lepší chemickou stabilitu za vysokých teplot. Naopak pro náročnější operace z hlediska řezných sil, jako je přerušovaný řez, se volí pevnější CBN. [19][8]

Limitní tvrdost soustružené součásti pro používané řezné materiály:

Tabulka 2 – Limitní tvrdost součástí pro řezné materiály [21]

CBN	~70 HRC
Keramika	~63 HRC
Slinutý karbid	~58 HRC

3.3.1 CBN/PCBN

CBN/PCBN je druhým nejtvrdějším materiálem hned za PCD (polykrystalický diamant). CBN představuje syntetický materiál uspořádaný do šestiúhelníkové krystalické struktury. Vzniká za pomoci vysokoteplotní a vysokotlaké syntézy atomů boru a dusíku. Samotné krystaly CBN jsou k sobě vázány pomocí pojiva a tvoří výsledný řezný materiál PCBN (polykrystalický CBN). [22]

PCBN disponuje vysokou tvrdostí za tepla, houževnatostí a odolností vůči tepelným šokům. Jeho vlastnosti umožňují využití vysokých řezných rychlostí. [23]

Moderní řezné materiály z CBN lze rozdělit do skupin dle obsahu CBN a použitého pojiva. Jedna z moderních nástrojových tříd je skupina keramických kompozitních materiálů s obsahem CBN 40-65 %. Keramické pojivo zvyšuje odolnost CBN proti opotřebení. Další skupinou nástrojových materiálů jsou materiály s obsahem CBN až 85-100 %. U těchto skupin s vysokým zastoupením CBN se často používá kovové pojivo pro zvýšení houževnatosti. [23]

CBN nástrojové třídy slouží převážně pro dokončovací operace tvrzených ocelí, popřípadě pro vysokorychlostní hrubování šedé litiny. Při obrábění měkčích ocelí, tj. pod 45 HRC, dochází kvůli vyššímu množství feritu v mikrostruktuře obrobku k výraznému snížení odolnosti proti otěru. [23]

3.3.2 Keramika

Pro tvrdé soustružení lze také použít řeznou keramiku jako alternativu k CBN. Keramika se řadí mezi nekovové anorganické materiály. Vyznačuje se vynikající odolností proti otěru při použití vysokých řezných rychlostí. Negativními vlastnostmi keramiky jsou její nízká odolnost proti trhlinám z tepelného šoku a malá lomová houževnatost. [23]

Využívání keramiky jako řezného materiálu započalo vývojem keramických kompozitů a slitin, které lze rozdělit dle chemického složení na dva základní typy: oxidová a nitridová. Základ oxidové řezné keramiky tvoří oxid hlinitý Al_2O_3 . Pro zlepšení řezných vlastností jsou do oxidové keramiky přidávána aditiva, kterými

mohou být TiN, TiB, Ti(C,N) a Zr(C,N). Nejčastěji používané keramické řezné materiály na bázi Al_2O_3 jsou $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ a $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_3$. Nitridová keramika je materiál na bázi nitridu křemičitého (Si_3N_4). Při přípravě ostří je nutné dbát ohled na křehkost samotné keramiky. Aby se zabránilo vylamování břitu při výrobě, je prováděno jeho honování. [15][22]

Základní rozdělení typů používané řezné keramiky: [23]

- Oxidová keramika – složena převážně z Al_2O_3 doplněná přísadou ZrO_2 , který brání vzniku trhlin, chemicky stabilní, nízká odolnost proti tepelným šokům
- Smíšená keramika – přidané přísady kubických karbidů nebo karbonitridů (TiC, Ti(C,N)), zvýšená houževnatost a tepelná vodivost
- Whiskery vyztužená keramika – obsahuje whiskery karbidu křemíku (SiC_w), pro obrábění niklových slitin, rapidní nárůst houževnatosti, umožňuje použití řezné kapaliny
- Nitridová keramika – tvořená na bázi nitridu křemíku Si_3N_4 , podlouhlé tvary krystalů, vysoká houževnatost a schopnost samovyztužení, pro obrábění šedé litiny, nízká chemická stabilita neumožňuje obrábění jiných materiálů

3.3.3 Slinutý karbid

Kromě využívání CBN a keramiky jako řezných materiálů pro tvrdé soustružení, lze v mnoha případech použít alternativu v podobě slinutého karbidu. Slinutý karbid tvoří částice karbidů (WC, TiC, TaC, NbC) vázané kovovým pojivem, nejčastěji kobaltem. Využití slinutého karbidu pro tvrdé soustružení bylo možné až po rozvoji materiálů a technologií pro povlakování, které úzce souvisí se životností nástroje a schopností tvrdě obrábět. Z ekonomického hlediska je slinutý karbid nejlevnější variantou, která však nemusí vyhovovat mnoha aplikacím z důvodu příliš vysoké tvrdosti obráběného materiálu vedoucí ke krátké životnosti břitu. [24][25][26]

3.4 Řezná prostředí

Řezné prostředí lze definovat jako soubor okolností a faktorů, ve kterém dochází k samotnému řeznému procesu při obrábění. Tato prostředí zahrnují fyzikální a chemické podmínky ovlivňující výsledek obráběcího procesu. Základním řezným prostředím je okolní vzduch. Dalšími složkami mohou být řezné kapaliny, oleje, mlhoviny i některé plyny. Hlavním úkolem řezného prostředí je chladicí a mazací účinek. Média používaná pro chlazení a mazání pomáhají odvádět přebytečné teplo z místa řezu, snižují intenzitu otupování nástroje a zlepšují výslednou drsnost obrobené plochy. [27]

Nedílnou funkcí řezného prostředí je odvod třísky z místa řezu. Při obrábění se většina (80 %) tepla odvede právě do třísky. Z tohoto důvodu je odvod třísek důležitým aspektem. [28][29]

Konkrétní způsoby implementace řezného prostředí do výroby jsou různé. Dělí se především podle chemického složení a způsobu přivedení média do místa řezu. Specifickým případem řezného prostředí je suché prostředí, do kterého není přiváděna žádná chladicí kapalina. Takový způsob obrábění je známý jako obrábění za sucha. [30]

V případě tvrdého soustružení lze obrábět za sucha díky vyhovujícím vlastnostem řezných materiálů CBN a keramiky. Jejich vysoká tepelná a chemická odolnost umožňuje omezení nebo případnou eliminaci potřeby aktivního chlazení. Při přerušovaném soustružení může použití chladicí kapaliny vést k teplotnímu šoku a následnému vzniku trhliny v řezném materiálu. Možnost obrábění za sucha vede také ke snížení nákladů a ekologické stopy výroby. Ve specifických případech a obzvláště náročných podmínkách však může být využití nějaké formy chlazení a mazání nezbytné. Takovým případem je nutnost kontroly tepelné stability obrobku, kdy je důležité zajistit kontinuální přívod řezné kapaliny do místa řezu v průběhu celé délky obráběcí operace. [30][28][31]

3.5 Nástroje pro tvrdé soustružení

Nástrojové třídy VBD se volí na základě: [11]

- druhu obráběného materiálu (případ tvrdého soustružení – ISO H)
- typu operace (dokončování, střední obrábění, hrubování)
- podmínek soustružení (dobré, průměrné, náročné)

Vyměnitelné břitové destičky z CBN s pájeným hrotem jsou z ekonomického hlediska 3-4krát nákladnější než keramické z důvodu rychlejšího opotřebení. Dosahují však lepších přesností, v rozsahu tolerance menší jak 0,025 mm. Z tohoto důvodu mohou být VBD z CBN použity spíše na dokončovací operace, zatímco keramické na proces hrubování. [31][17]

Vlastnosti VBD z CBN: [17]

- přesnost $\pm 0,01$ mm, lepší přesnosti lze dosáhnout jen broušením
- až 8 řezných hran na jedné destičce
- relativně nízké výrobní náklady
- dosažení lepší drsnosti povrchu díky jemné mikrostruktuře
- velmi vysoká houževnatost umožňující přerušovaný řez

Břitové destičky na bázi CBN lze rozdělit na VBD s pájenou řeznou hranou a na monolitní VBD z PCBN. Dělí se také podle množství obsahujícího CBN v samotném řezném materiálu. Toto množství má přímý vliv na odolnost proti opotřebení hran. Nižší obsah CBN zajišťuje lepší odolnost proti opotřebení, naopak se zvyšujícím se obsah CBN roste pevnost. [17]

Keramické VBD se dělí z hlediska druhu použitého keramického materiálu. Pro soustružení tvrdých materiálů je nejčastěji využívána černá keramika, která se skládá cca ze 70 % Al_2O_3 a 30 % příměsí TiC. V dalším odstavci jsou pro příklad uvedené vlastnosti právě černé keramiky. Pro řadu dalších aplikací tvrdého soustružení lze samozřejmě použít zcela jiné složení řezné keramiky. [17]

Vlastnosti VBD z černé keramiky: [17]

- přesnost $\pm 0,025$ mm, vhodné pro díly s větší tolerancí
- až 8 řezných hran na jedné destičce
- ekonomicky výhodnější oproti CBN
- vhodné pro hrubovací proces a následné dokončování pomocí CBN
- houževnatost umožňující přerušovaný řez, nicméně menší jak u CBN
- při souvislém (nepřerušovaném) obrábění je životnost nástroje podobná jako u CBN

Tvrdé soustružení vyžaduje specifické geometrie břitových destiček, jelikož při soustružení velmi tvrdých materiálů dochází již ke zmiňovanému generování vysokých teplot a řezných sil. Negativní soustružnické břitové destičky představují výhodnou volbu pro odolání náročných podmínek obrábění. Jejich silná řezná hrana dokáže absorbovat větší množství tepla a odolat velkým řezným silám díky její pevnosti. Při používání negativní geometrie je nutné zajistit dostatečný výkon stroje, protože spotřebovává až o 20 % více výkonu. Geometrie VBD se musí přizpůsobit vlastnostem obráběcího stroje, který se pro tvrdé soustružení používá. [11][32][33]

Charakteristika negativních břitových destiček: [11]

- vysoká pevnost břitu
- nulový úhel hřbetu
- odolává těžkým řezným podmínkám

V dnešní době výrobci břitových destiček nabízí širokou škálu geometrií. Rozvoj pokročilých řezných materiálů však zajistil možnost používání břitových destiček i s pozitivním provedením geometrie.

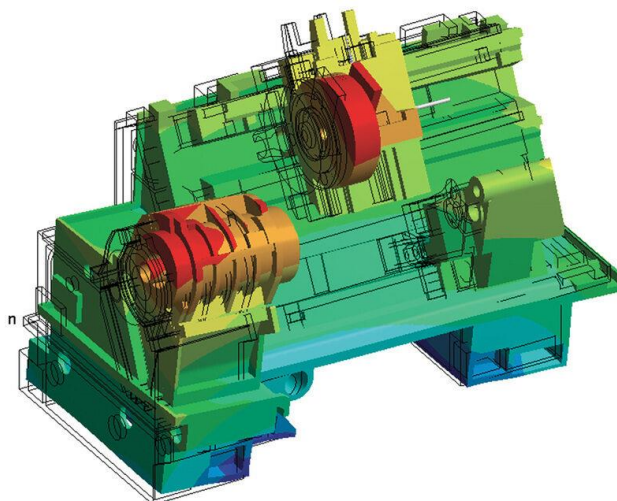
Za účelem lepší optimalizace obráběcího procesu mohou být použity nástroje a břitové destičky s povlakováním. Povlaky poskytují především ochranu proti opotřebení, což prodlužuje životnost nástroje. Dalšími užitečnými funkcemi

jsou snížení tření, zvýšení tvrdosti, zlepšení odolnosti vůči teplotě a chemickým procesům.

Povlaky lze obecně rozdělit do dvou skupin dle principu výroby na CVD (*Chemical Vapor Deposition*) a PVD (*Physical Vapor Deposition*). Mezi další charakteristiky patří chemické složení a struktura vrstev. Různé typy povlaků mají rozdílné mechanické vlastnosti, které jsou ovlivněny samotnou mikrostrukturou povlaku. Mezi nejběžnější materiály pro povlakování patří TiN, TiC, TiCN, TiAlN, Al₂O₃. [34][35]

3.6 Požadavky na stroje

Na obráběcí centra určená pro tvrdé soustružení jsou kladeny vysoké požadavky. Tyto požadavky plynou z rozsáhlých nároků na finální obrobky, které vyžadují vysokou přesnost a jakost obrobené plochy. Pro dodržení přísně předepsaných parametrů (drsnot povrchu, kruhovitost, válcovitost apod.) je nutné při výrobě využívat vhodný soustružnický stroj. Takový stroj musí být dostatečně tuhý a teplotně stabilní, aby byly případné teplotní deformace a házení stroje co nejvíce eliminovány. [36][37]



Obrázek 7 - Teplotní analýza soustruhu [37]

Aplikace šikmého lože při obrábění zaručuje vysokou tuhost stroje. Takový stroj s optimální tuhostí umožňuje přesné soustružení i ve více dynamicky namáhaných cyklech. Při obrábění za sucha je pomocí šikmého lože zaručen odvod třísek z místa stroje do přidělených třískových dopravníků. [38]

Významní výrobci strojů pro tvrdé soustružení:

- Hardinge
- Danobat – Hemburg
- Schaublin
- Kemmer

3.7 Doporučení pro tvrdé soustružení

Přesnost soustružení není ovlivněna pouze vlastnostmi stroje a nástroje. Velký vliv mají také faktory jako způsob upnutí obrobku, jeho vyložení, mikrogeometrie břitové destičky a tak dále. Pro obrábění tvrzených součástí existují doporučení, podle kterých lze dosáhnout lepší kvality obrobenej plochy. Dále jsou v této kapitole uvedeny praktické rady od společnosti Sandvik Coromant z webových stránek [28].

Jestliže výroba dílu zahrnuje také vlastní přípravu a obrábění polotovaru před vytvrzovacím procesem, je vhodné dodržet následující body:

- zamezení tvorby otřepů
- dodržení rozměrových tolerancí včetně přídavek na tvrdé obrábění
- obrobění poloměru
- zkosení hran

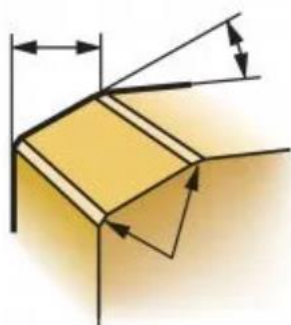
Seřízení obráběcího stroje zajišťuje správný provoz výrobního procesu. Cílem optimálního seřízení je nastavení součástí stroje tak, aby byla zaručena jeho přesnost a stabilita. Zde je uvedeno několik kroků, které vedou ke správnému seřízení:

- zaručená stabilita obráběcího stroje
- stabilní upnutí a vyrovnání obrobku
- při podepření obrobku pouze na jednom konci dodržet poměr délky vůči průměru maximálně 2 : 1, podepření koníkem tento poměr zvyšuje
- tepelně symetrická konstrukce vřeteníku a koníku
- maximální tuhost zaručuje minimalizace všech vyložení

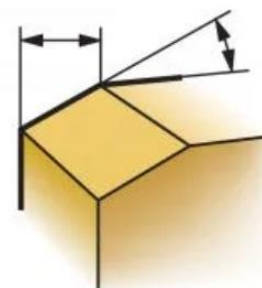
- použití nástrojů s karbidovou stopkou nebo tlumených nástrojů (především pro vnitřní soustružení)

Pro dokonalejší řez při tvrdém soustružení lze využít specifické břitové destičky s upravenou mikrogeometrií. Společnost Sandvik Coromant nabízí dvě charakteristické úpravy řezné hrany u CBN destiček:

- Typ S: Fazetka VBD je upravená honováním, aby byla zaručena nejvyšší pevnost řezné hrany. Tato mikrogeometrie není příliš náchylná na vylamování mikročástic z břitu a podporuje konzistentní kvalitu výsledného povrchu.
- Typ T: Fazetka VBD bez honování vytváří při spojitém řezu nejvyšší kvalitu obrobeneho povrchu a při přerušovaném řezu minimalizuje tvorbu otřepů. Při soustružení dochází také ke generování nižších řezných sil.



Obrázek 9 - Fazetka typu S [28]



Obrázek 8 - Fazetka typu T [28]

Při stabilních podmínkách obrábění je možné volit z katalogové nabídky Sandvik Coromant VBD se speciální hladící geometrií. Hladící geometrie rohu břitové destičky umožňuje dosahovat nejvyšší kvality povrchu. Tato geometrie není vhodná pro nestabilní podmínky, například při obrábění štíhlých obrobků.

Aby byl zajištěn stabilní obráběcí proces, je nutné optimalizovat výměny břitových destiček. Kritériem pro výměnu destičky bývá většinou předem stanovená maximální hodnota drsnosti povrchu. Opotřebením destičky způsobuje zhoršení drsnosti povrchu. Pro odladěný proces a omezení zmetkovitosti se však doporučuje volit jako kritérium předem určený počet obrobeneých součástí. Tento

počet by měl být o 10-20 % nižší, než počet odpovídající předem stanovené drsnosti povrchu.



Obrázek 10 - Kritérium výměny VBD [28]

4. INTEGRITA POVRCHU PO TVRDÉM SOUSTRUŽENÍ

Integritu povrchu lze definovat jako stav povrchu, který byl vytvořen obráběním nebo jinou operací, při které vzniká nová povrchová vrstva. Integrita povrchu zahrnuje důsledky působení výrobního procesu a jeho podmínek. [39][40]

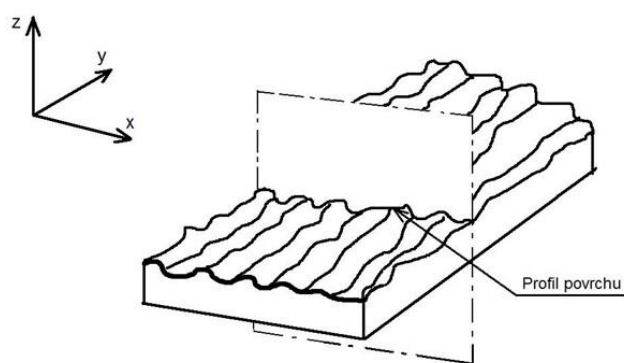
Povrchové vlastnosti jsou důležitým hlediskem při hodnocení vyrobených součástí. To platí zejména u komponent odolných proti opotřebení, protože jejich povrch funkčních ploch musí splňovat přísná kritéria, aby byla naplněna jejich funkčnost. [41]

Povrch součástí je ovlivňován po celou dobu výrobního procesu, během kterého na něj působí celá řada vlivů. Ty mohou být členěny na vnější a vnitřní. Mezi vnější vlivy patří: mechanické (napětí), chemické (koroze), fyzikální (záření apod.) a jejich kombinace. Za vlivy vnitřní lze považovat: zbytkové pnutí, morfologii povrchu (drsnost, vlnitost), mechanické vlastnosti povrchu (tvrdost, zpevnění atd.) a přítomnost povrchových vad. [42]

Následující podkapitoly se věnují pouze parametrům drsnosti povrchu a mikrotvrdosti z důvodu praktického experimentu, ve kterém jsou právě tyto dvě složky integrity povrchu zkoumány.

4.1 Parametry drsnosti povrchu

Reálný profil povrchu v sobě zahrnuje dva typy nerovností, makronerovnost a mikronerovnost. Makronerovnost, pod kterou spadá například vlnitost, je způsobena vibracemi stroje a dalšími vnějšími vlivy. Mikronerovnost zapříčiňuje přímo řezný nástroj při svém řezném pohybu. Za mikronerovnost je označována drsnost povrchu. Drsnost povrchu lze dle normy ČSN EN ISO 21920-2 definovat jako „*souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které nevyhnutelně vznikají při výrobě nebo jejím vlivem*“. [43][44]



Obrázek 11 – Profil povrchu [43]

Většina obráběných dílů má předepsanou toleranci pro drsnost povrchu. Jedná se především o funkční plochy, u kterých je nutné dosáhnout dané přesnosti pro jejich funkčnost. Dosažení požadované drsnosti povrchu je nezbytné z mnoha důvodů, např. tření, povrchové deformace, tepelná a elektrická vodivost, těsnost a geometrická přesnost. U tvrdého soustružení lze dosáhnout řádově stejné drsnosti povrchu jako u broušení. Nedílnou součástí výroby přesných dílů je právě měření a kontrola drsnosti. Skutečný povrch nelze pro svoji složitost kompletně popsat. Existují metody měření a vyhodnocení pro zjednodušení jeho popisu. Parametry drsnosti povrchu lze rozdělit na parametry amplitudy, rozteče a parametry smíšené. Mohou být měřeny a počítány ve 2D či 3D prostoru. 2D parametry zkoumají povrch v jedné linii na povrchu, kdežto 3D zaujímají určitou plochu. [45]

V kontextu experimentu je v teoretické části věnována pozornost pouze parametrům průměrné hodnoty drsnosti (R_a , R_q) a hloubce drsnosti (R_z , R_{max}).

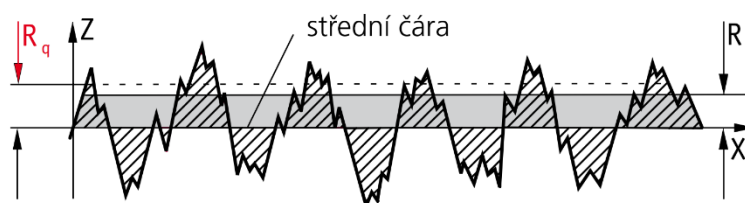
4.1.1 Průměrná aritmetická a kvadratická hodnota drsnosti (R_a , R_q)

Střední hodnota drsnosti R_a popisuje drsnost povrchu jako aritmetický průměr všech naměřených hodnot profilu $Z(x)$ na měřené délce l . Hodnota R_q se počítá jako kvadratický průměr těchto hodnot. [46]

Výpočty R_a a R_q : [46]

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (4.1)$$

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx} \quad (4.2)$$



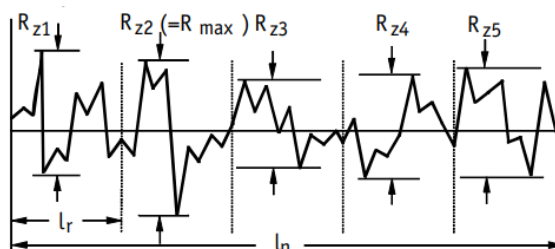
Obrázek 12 - Drsnost povrchu R_a a R_q [46]

4.1.2 Hloubka drsnosti (R_z , R_{max})

Hloubka drsnosti (R_z) je aritmetická střední hodnota určená z hloubek drsnosti (R_{z1}) naměřených na povrchu součásti. Největší jednotlivá hodnota hloubky drsnosti na celé měřicí dráze nese označení R_{max} . [46]

Výpočet R_z : [46]

$$R_z = \frac{1}{n} (R_{z1} + R_{z2} + \dots + R_{zn}) \quad (4.3)$$



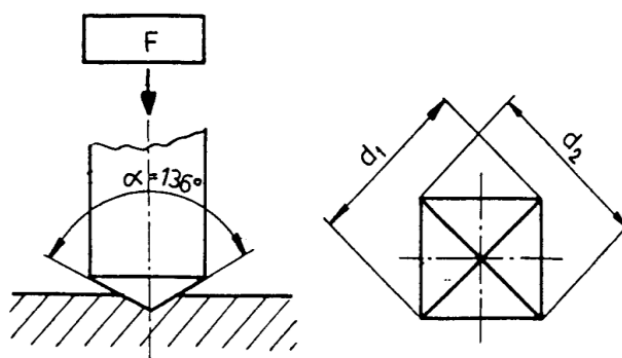
Obrázek 13 - Drsnost povrchu R_z a R_{max} [46]

4.2 Mikrotvrdotost

Tvrdotost definujeme jako odolnost materiálu proti deformaci, která je vyvozená zatěžovacím tělesem. Zkoumá se na povrchu tělesa pomocí různých zatěžovacích těles s přesnou geometrií. Naměřená tvrdost povrchu je odvozena mírou (plochou nebo hloubkou) trvalé plastické deformace vzniklé v průběhu zkoušky. Nejčastějšími zkouškami tvrdosti jsou metody statické s předepsanou velikostí zatížení. [47]

Měření tvrdosti lze realizovat pomocí Vickersovy nebo Knoopovy metody. Obě metody jsou založeny na vlačování diamantového tělesa (jehlanu) do povrchu silou od 1g (0,09807 N) do 1000g (9,807 N). Pro zkoušku mikrotvrdotosti dle Vickerse je rozsah zkušebního zatížení $0,09807 \text{ N} \leq F < 1,961 \text{ N}$. Po odlehčení je měřena úhlopříčka vtisku, ze které je dopočtena hodnota tvrdosti HV. [48]

Schéma Vickersovy zkoušky včetně vyhodnocení: [48]



Obrázek 14 - Vickersova zkouška tvrdosti [48]

$$HV = 0,012 \cdot \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (4.4)$$

Kde: HV – hodnota tvrdosti podle Vickerse, F – zkušební zatížení [N],
 d - aritmetický průměr velikosti úhlopříček vtisku [mm], 0,1891 – konstanta

Značení výsledné tvrdosti podle Vickerse se zapisuje hodnotou tvrdosti před písmeny HV a číslicí charakterizující velikost zkušebního zatížení v kilopondech. V případě, že byla použita jiná doba zatížení než 10 až 15 s, následuje navíc za lomítkem doba zátěže v sekundách. [49]

4.3 Vliv parametrů tvrdého soustružení na integritu povrchu

Integrita povrchu v sobě zahrnuje vlastnosti funkčních ploch, které vznikají v průběhu výrobních operací. V závislosti na nastavení parametrů obrábění se mění nejen drsnost povrchu, ale i mikrotvrdot. Zásadní vliv na tyto složky integrity povrchu mají především řezná rychlost, rychlost posuvu a hloubka řezu. Rychlost posuvu má statisticky nejvýznamnější vliv na výslednou drsnost povrchu, zatímco hloubka řezu ji ovlivňuje takřka zanedbatelně. Mikrotvrdot je ovlivňována nastavením řezné rychlosti, která svým zvýšením zapříčiňuje generování vyšších teplot, což má přímý vliv na výslednou mikrostrukturu. Předpokládá se, že dosažení nejlepší možné integrity povrchu je při nízké rychlosti posuvu a hloubky řezu v kombinaci s vysokou řeznou rychlostí. [50]

Ovlivňujícím faktorem je také řezné prostředí. Ačkoliv se tvrdé soustružení běžně realizuje v suchém prostředí, existují však prostředí, ve kterých je dosaženo lepší drsnosti povrchu. Takovým prostředím je tzv. near-dry, také často označované jako MQL (Minimum Quantity Lubrication). Near-dry/MQL prostředí je skupina řezných prostředí, kde se do místa řezu přivádí minimální množství řezné kapaliny většinou v kombinaci s proudem stlačeného vzduchu. Studie „*Surface Integrity of AISI 52100 Steel during Hard Turning in Different Near-Dry Environments, 2020*“ ukazuje, že v prostředích near-dry lze dosáhnout až o 30 % lepší drsnosti povrchu, jelikož dochází k menšímu tření a opotřebování nástroje. Zlepšení výsledné drsnosti povrchu, v porovnání se suchým prostředím, je doprovázeno snížením mikrotvrdoti o jednotky procent. Snížení mikrotvrdoti je zapříčiněno omezením deformačního zpevnění za pomoci chladících a mazacích účinků. [51]

5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část je rozdělena do dvou hlavních částí. Obě části zkoumají vliv řezné rychlosti při tvrdém soustružení. První část experimentu se věnuje analýze dosažené integrity povrchu. Druhá část je zaměřena na analýzu řezných sil. Každé části je věnována samostatná podkapitola, kde jsou uvedeny dílčí cíle, postup, naměřená data a jejich vyhodnocení. V rámci experimentu bylo provedeno vlastní tepelné zpracování dílů, na kterých byl proveden výzkum. Tato praktická část práce byla realizována v laboratořích Fakulty strojní ČVUT.

5.1 Příprava součástí

Před samotným obráběním bylo nutné provést přípravy součástí. Takové přípravy zahrnovaly výběr vhodného materiálu, nadělení dílčích polotovarů na požadované rozměry a obrobení v měkkém stavu. Finální přípravou bylo tepelné zpracování dílů pro dosažení tvrdosti naplňující předpoklady tvrdého soustružení.

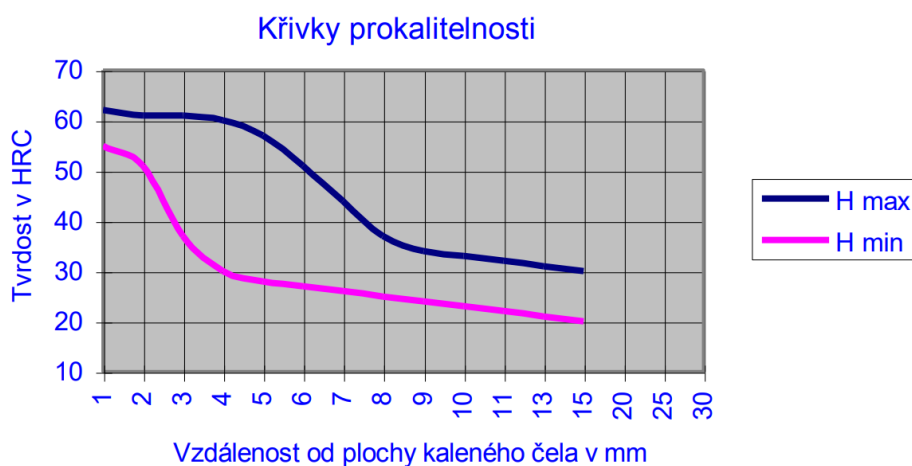
5.1.1 Materiál

Pro výrobu součástí k experimentální části byl zvolen materiál C45E. Alternativní značení tohoto materiálu může být 12 050 (podle ČSN), nebo 1.1191 (podle EN). Jedná se o nelegovanou ušlechtilou ocel k zušlechťování. Tato ocel je vhodná i k povrchovému kalení plamenem či indukcí. Tento materiál je často používán pro výrobu méně namáhaných strojních dílů ve stavu zušlechtěném nebo normalizačně žíhaném. Obrobitelnost třískovým obráběním válcovaných tyčí může být ztížena vlivem zvýšené pevnosti. Pro lepší podmínky obrobitelnosti je výhodné obrábět ve stavu žíhaném na měkko, nebo lze využít ocel C45R s řízeným obsahem síry. Další informace včetně mechanických vlastností jsou uvedeny v materiálovém listě (Seznam příloh). [52]

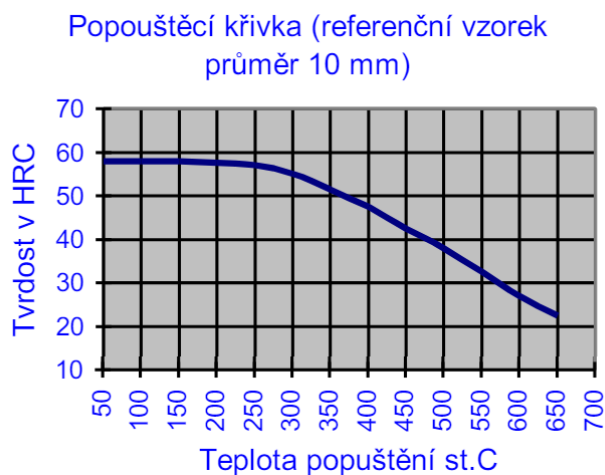
Tabulka 3 - Chemické složení oceli C45E (12 050) v hm. % [52]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
0,4-0,52	max 0,43	0,46-0,84	max 0,035	max 0,035	max 0,45	max 0,13	max 0,45

Hlavním důvodem použití oceli C45E je zaručená tvrdost po zakalení. Zaručená tvrdost povrchové vrstvy po zakalení je dle materiálového listu (Seznam příloh) min. 55 HRC, což je pro tento experiment plně dostačující. Prodejce ocelí pro ocel objednanou bez konkrétních požadavků na prokalitelnost uvádí ve svých materiálových listech pouze informativní křivky prokalitelnosti.



Obrázek 15 – Křivka prokalitelnosti oceli C45E (12 050) [52]



Obrázek 16 - Popouštěcí křivka oceli C45E (12 050) [52]

5.1.2 Obrábění v měkkém stavu

Polotovary součástí byly válcované tyče kruhového průřezu EN 10 060 (DIN 1013) o průměru 40 mm a 80 mm. Tyče byly nařezány na strojní pásové pile. Rozměry součástí byly voleny tak, aby bylo reálné dosáhnout požadovaných řezných podmínek a vyložení dílů při soustružení. Délkový rozměr musel zaručit dostatečný prostor pro testování a vyhodnocení různých nastavení řezných podmínek. Pro obrábění v měkkém nezakaleném stavu byl použit konvenční soustruh TOS SV 18 R.



Obrázek 17 - Konvenční soustruh TOS SV 18 R

Provedené operace v měkkém stavu:

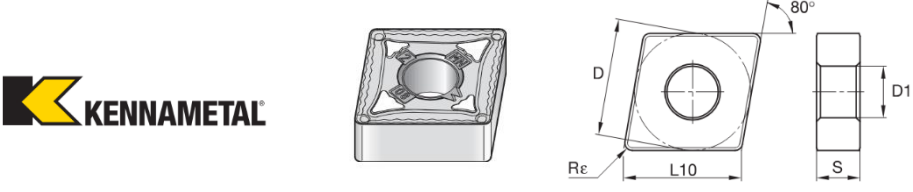
- zarovnání čel
- zkosení hran 1 mm x 45°
- navrtání středících důlků typu A z každé strany
- zarovnání rotačních ploch

Středící důlky byly na součástech navrtány pro případ nutnosti podepření obrobku v dalších částech experimentu. Tato možnost nakonec nenastala, jelikož bylo vždy dodrženo optimální vyložení při upnutí, které nezpůsobovalo výrazné

chvění či házení obrobku při soustružení. Využity byly pouze v případě zarovnání rotačních ploch v měkkém stavu.

K zarovnání podélných rotačních ploch a čel byla použita karbidová VBD od firmy Kennametal s ISO označením CNMG 120404MN. Tato destička disponuje negativní geometrií a vícevrstevným CVD povlakem. Je vhodná pro aplikace středního hrubování. Další vlastnosti VBD jsou uvedeny v následující tabulce:

Tabulka 4 – Parametry VBD – CNMG 120404MN [53]

CNMG 120404MN	
	
Výrobce	Kennametal
Stupeň karbidu	KC9125
CVD povlak	K-MTCVD TiCN-Al ₂ O ₃ -TiCN-TiN
α (úhel hřbetu)	0°
D (průměr vepsané kružnice)	12,7 mm
L10 (délka řezné hrany)	12,9 mm
S (tloušťka)	4,76 mm
R _ε (rádius špičky)	0,4 mm
D1 (průměr upevňovacího otvoru)	5,16 mm

Pro navrtání středících důlků byl použit standartní středící vrták DIN333 tvaru A. Upnutí vrtáku bylo zajištěno pomocí rychloupínacího samosvorného sklíčidla na koníku.

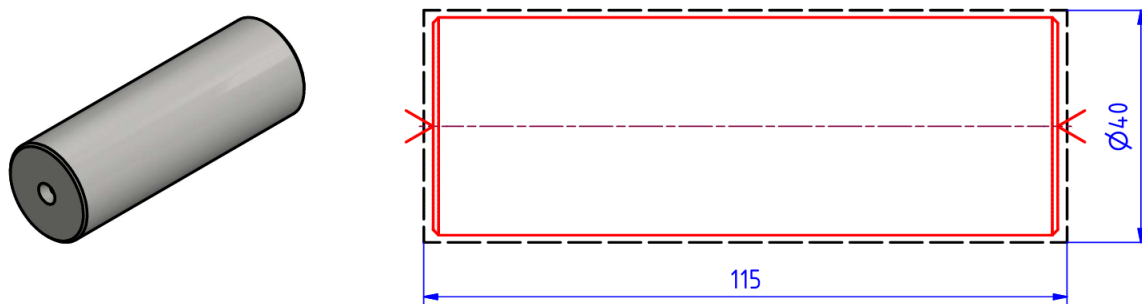


Obrázek 18 - Středící vrták [54]



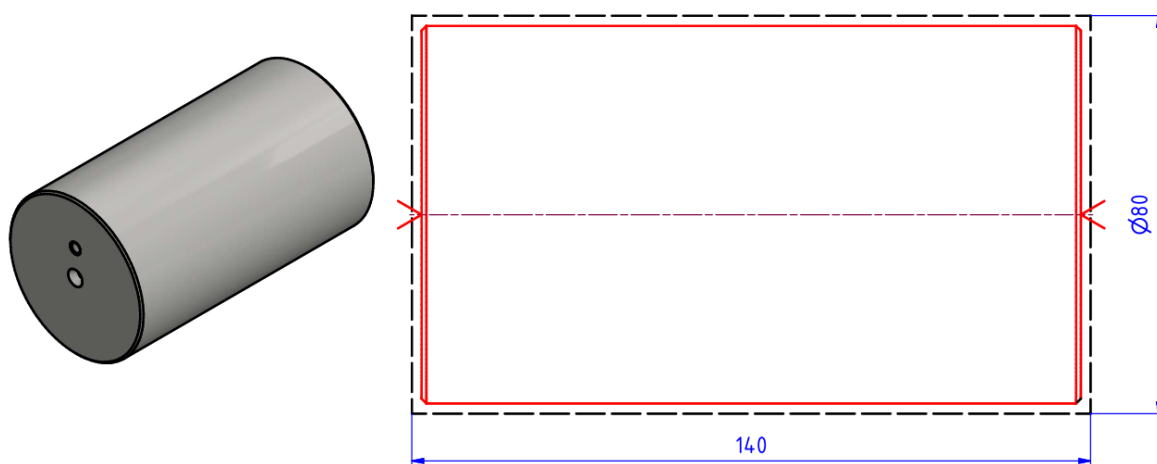
Obrázek 19 - Rychloupínací samosvorné sklíčidlo [55]

Součást č. 1 pro analýzu integrity povrchu:



Obrázek 18 - Obrábění součásti č. 1 v měkkém stavu

Součást č. 2 pro analýzu řezných sil:



Obrázek 19 - Obrábění součásti č. 2 v měkkém stavu

Součást pro analýzu řezných sil je výrazně objemnější. Z tohoto důvodu byla na čele součásti v blízkosti osy vyrobena závitová díra M6 (znázorněná na 3D modelu součásti) pro přichycení držáku, který usnadnil manipulaci při tepelném zpracování.



Obrázek 20 - Obrobené součásti v měkkém stavu

5.1.3 Kalení

Pro zvýšení tvrdosti materiálu byly součásti zakaleny. Kalení je druh tepelného zpracování, při kterém vzniká nerovnovážná struktura martenzitického typu potlačením difúzní fázové přeměny prudkým ochlazením z kalící (austenitizační) teploty. Po kalení je struktura materiálu tvořena martenzitem a zbytkovým austenitem. Proces kalení se skládá z ohřevu materiálu na kalící teplotu, výdrže na teplotě a prudkého ochlazení v chladícím médiu. Chladícím médiem může být voda nebo olej. [49]

Postup kalení součástí:

1) Ochranný nátěr

Před kalením se na součásti aplikoval ochranný nátěr CONDURSAL Z1100. Tento ochranný nátěr chrání součásti proti oxidaci a oduhličení při tepelném zpracování v pecích bez ochranné atmosféry v rozmezí teplot 600-1100 °C. Před samotnou aplikací nátěru byly součásti důkladně očištěny a odmaštěny.

Následně se na součásti nanesly dvě vrstvy nátěru. Každá vrstva schnula přibližně 10-15 min.



Obrázek 21 - Aplikace ochranného nátěru CONDURSAL Z1100

2) Ohřev + výdrž na teplotě

Pro ohřev součástí byla použita komorová pec značky Nabertherm. Před ohřevem součástí se nechala pec vyhřát na teplotu 860 °C. Kalící teplota byla určena na základě informací z materiálového listu (Seznam příloh). Doba prohřevu součástí se stanovila dle závislosti času na průměru dílu 0,5 min/mm. Doba výdrže na dosažené kalící teplotě byla 40 min.

Tabulka 5 – Podmínky kalení

Podmínky kalení	Součást č. 1 (Ø 40 mm)	Součást č. 2 (Ø 80 mm)
Kalící teplota	860 °C	860 °C
Doba prohřevu	20 min	40 min
Doba výdrže na teplotě	40 min	40 min



Obrázek 24 - Komorová pec Nabertherm



Obrázek 25 - Nastavení teploty v peci

3) Ochlazení

Ochlazení součástí proběhlo ve vodě ihned po vyndání součástí z pece.



Obrázek 22 - Zakalená součást č. 1

6. ANALÝZA INTEGRITY POVRCHU PO TVRDÉM SOUSTRUŽENÍ V ZÁVISLOSTI NA ŘEZNÉ RYCHLOSTI

Hlavním cílem první části experimentu bylo zjistit, zda má řezná rychlost významný vliv na dosaženou integritu povrchu po tvrdém soustružení. Každý výrobce VBD doporučuje ideální řezné podmínky pro obráběcí proces. Pro tento experiment byly voleny řezné rychlosti i vyšší než doporučované. Po obrobení se na dokončeném dílu měřila a vyhodnocovala drsnost povrchu. V další fázi se připravily metalografické výbrusy, na kterých se měřila mikrotvrdost povrchové vrstvy. Zjišťovalo se, zda byla povrchová vrstva degenerovaná např. možným popuštěním, ke kterému by mohlo dojít v přítomnosti vysokých teplot v místě řezu. Na závěr se na metalografických výbrusech analyzovala struktura materiálu pomocí mikroskopu.

Pro soustružení součásti č. 1 v zakaleném stavu byl využitý soustruh Okuma Genos L200E-M. Jedná se o CNC soustruh se třemi řízenými osami, s poháněnými nástroji a koníkem. Tento soustruh je dostatečně tuhý a přesný pro vyhovění běžných operací tvrdého soustružení.

Tabulka 6 - Vybraná technická data soustruhu Okuma Genos L200E-M [56]



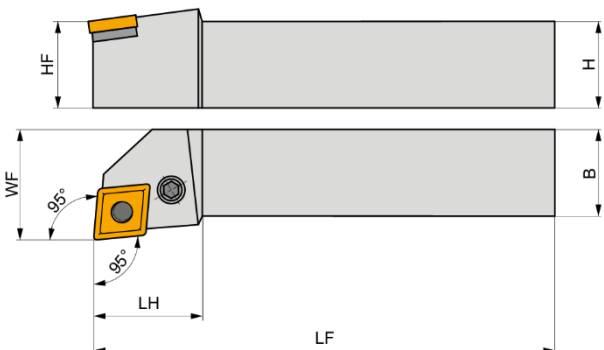
Vybraná technická data	
Pracovní prostor	
Velikost sklíčidla	8 "
Max. oběžný průměr	450 mm
Max. obráběný průměr	200 mm
Max. obráběná délka	380 mm
Vřeteno	
Otáčky	Max. 4500 ot/min
Výkon	11/7,5 kW
Kroutící moment	113 Nm
Revolverová hlava	
Počet nástrojových míst	12



Obrázek 23 - Soustruh Okuma Genos L200E-M

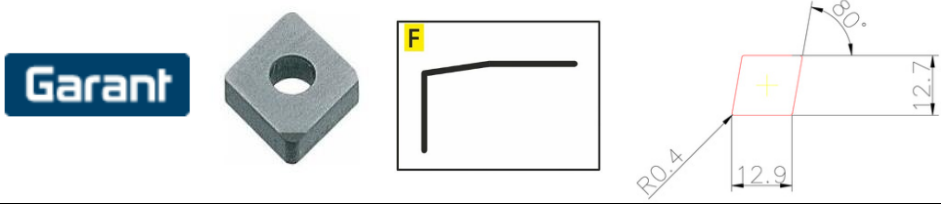
Použitý vnější držák nástroje s 95° úhlovým nastavením pro destičky CN upínané pákou:

Tabulka 7 - Parametry držáku nástroje - PCLNR 2020 K 12 [16]

PCLNR 2020 K 12	
 	
Výrobce	Dormer Pramet
H; B	20 mm; 20 mm
HF; WF	20 mm; 25 mm
LF; LH	125 mm; 36 mm
LAMS (úhel sklonu břitu nástroje)	-6 °
GAMO (ortogonální úhel čela nástroje)	-6 °

Použitá VBD s naletovanou špičkou CBN pro jemné dokončování při kontinuálním řezu ocelí nad 45 HRC:

Tabulka 8 - Parametry VBD - CNMA 120404 F [57]

CNMA 120404 F	
	
Výrobce	Garant
Řezný materiál	CBN
Typ	CBN720
Provedení řezné hrany	F
Průměr vepsané kružnice	12,7 mm
Rádus špičky	0,4 mm

Doporučené řezné podmínky:

Tabulka 9 - Doporučené řezné podmínky VBD - CNMA 120404 F [57]

Řezná rychlost v_c	120-400 m/min
Hloubka řezu a_p	0,05-0,2 mm
Posuv f	0,08-0,15 mm/ot

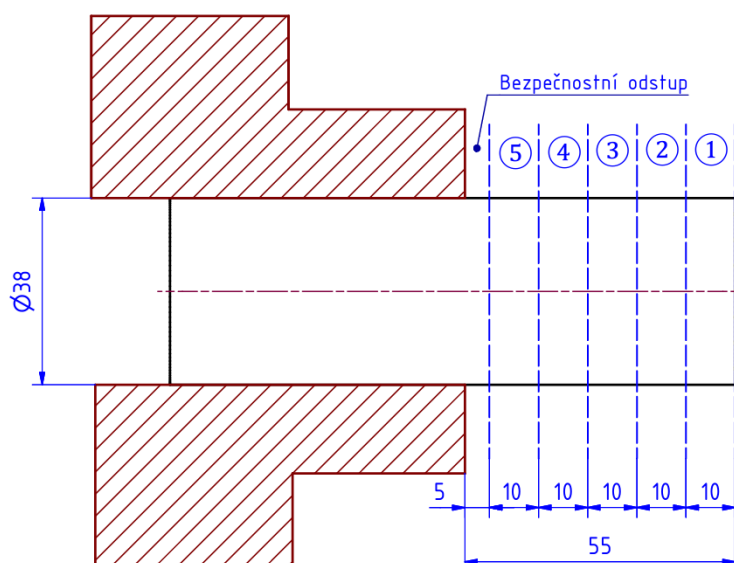
6.1 Strategie a průběh obrábění

Testování řezných rychlostí proběhlo na součásti č. 1, která byla rozdělena na 5 segmentů. Každý segment reprezentoval úsek, na kterém probíhalo soustružení rotační plochy jinou řeznou rychlostí. Řezné rychlosti se volily v intervalu od 100 m/min do 500 m/min.

V prvním kroku obrábění se zarovnal rotační plocha na průměr 38 mm při řezných podmínkách $v_c = 200 \text{ m/min}$; $a_p = 0,1 \text{ mm}$; $f = 0,1 \text{ mm/ot}$. Další kroky spočívali v obrobení segmentů 1-5 při řezných podmínkách $v_c = \text{podle segmentu}$; $a_p = 0,1 \text{ mm}$; $f = 0,1 \text{ mm/ot}$. Soustružení probíhalo za sucha bez využití chladicí/mazací kapaliny.

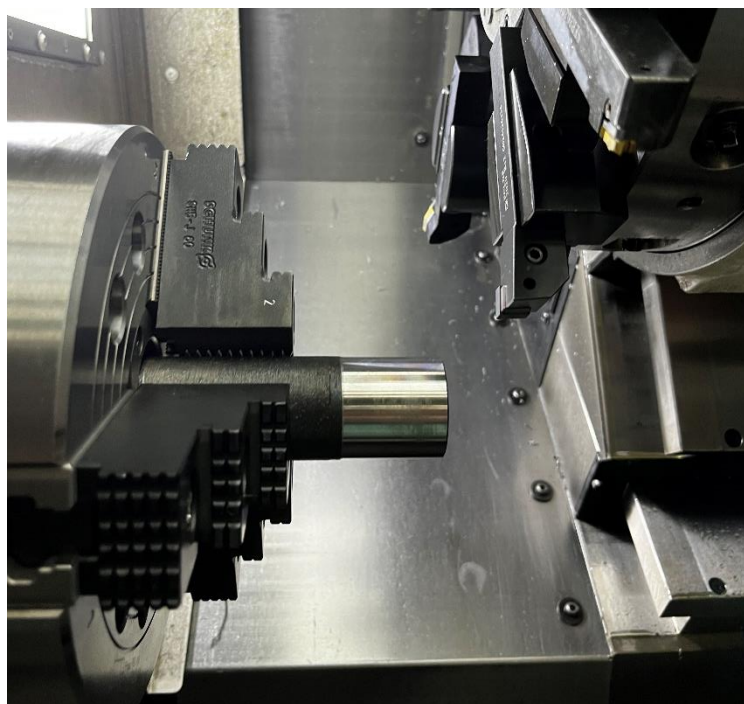
Tabulka 10 - Rozdělení segmentů na součásti č. 1

Číslo segmentu [-]	①	②	③	④	⑤
Řezná rychlost v_c [m/min]	100	200	300	400	500



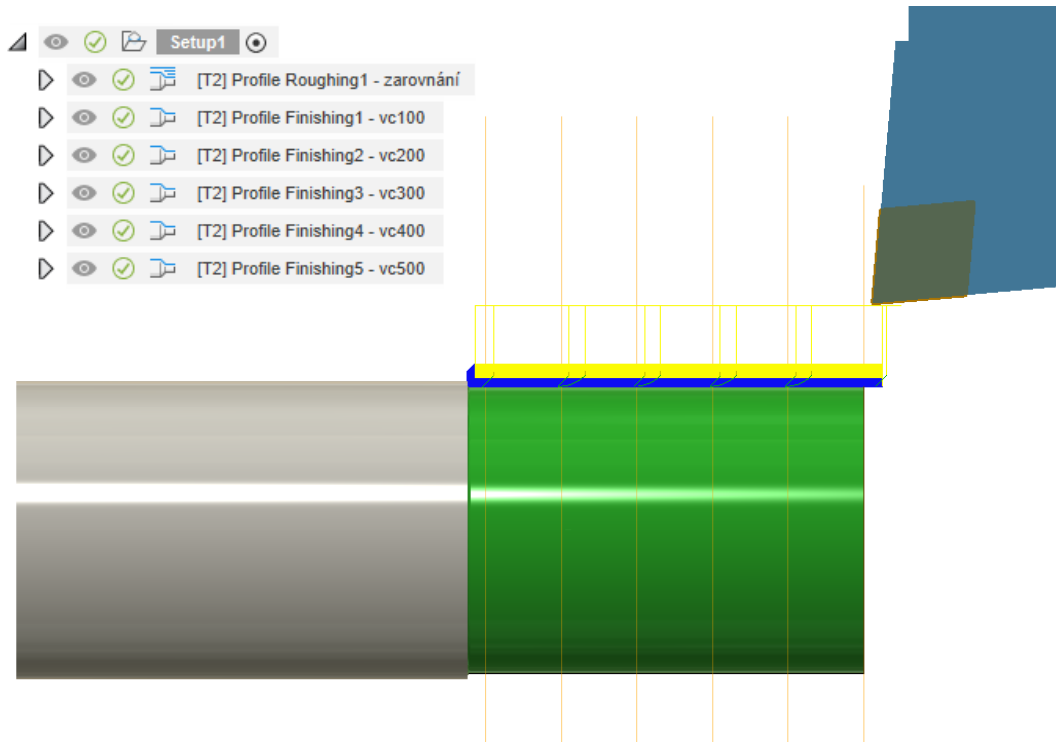
Obrázek 24 - Schéma upnutí součásti č. 1

Každému segmentu byla přidělena délka 10 mm. Délka 10 mm je optimální pro měření potřebných dat. Součást se upnula s vyložením 55 mm. Toto vyložení je v menším poměru délky : průměru než 2 : 1, tudíž se dá považovat jako dostatečně tuhé.



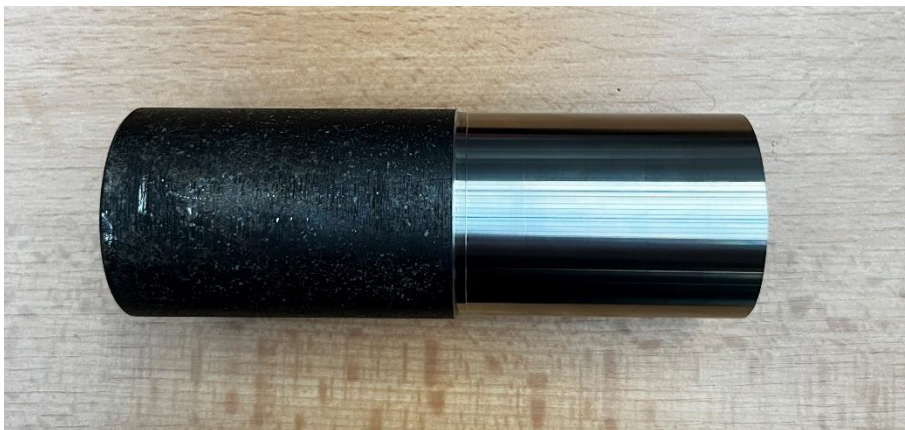
Obrázek 25 - Upnutí součásti č. 1 v soustruhu

Program pro obrábění byl vytvořen v programu Autodesk Fusion.



Obrázek 26 - NC program v Autodesk Fusion

Před soustružením se provedly nutné přípravy zahrnující kalibraci nástroje a určení nulového bodu osy Z, která leží v ose obrobku. Pro měření korekcí nástroje pro kalibraci se používá nástrojová sonda. Definování nulového bodu osy Z se provádí pomocí ručního přiblížení nástroje k ploše čela. Velikost mezery mezi nástrojem a čelem je měřena vkládáním planžet. Ideální tloušťka planžety je následně využita pro definování nulového bodu v řídicím systému stroje. Po úspěšné přípravě stroje byla součást obrobena.



Obrázek 27 - Obrobená součást č. 1 v zakaleném stavu

6.2 Měření drsnosti povrchu

Drsnost povrchu byla měřena pro zjištění závislosti na řezné rychlosti. Pro měření drsnostních parametrů se využil přenosný drsnoměr MarSurf PS 10 značky Mahr. Toto měřicí zařízení je vybaveno 2 μ m snímacím hrotem pro dotykovou metodu měření. Zařízení také umožňuje rychlý export protokolů ukládaných v paměti. [58]

Tabulka 11 - Vybrané technické parametry drsnoměru MarSurf PS 10 [58]

MarSurf PS 10	
Síla při měření	0,00075 N
Filtr podle ISO	Gaussův filtr podle ISO 16610-21
Snímač	Indukční snímač s patkou
Snímací hrot	2 μ m
Rozsah měření	0,35 mm
Rozlišení profilu	8 nm
Snímaná délka Lt podle ISO	1,5 mm; 4,8 mm; 15 mm; variabilní



Obrázek 28 - Drsnoměr MarSurf PS 10 [58]

Nastavení parametrů měření pro drsnosti povrchu segmentů 1-5:

Snímaná délka Lt = 4,8 mm

Lc filtr = ISO 16610-21 0,8 mm

Počet vzorkovacích délek N = 5

Ls filtr = 2,5 μ m

Rychlost měření Vt = 1,0 mm/s

Počet naměřených bodů = 9600

Výsledky měření a vyhodnocení jsou uvedeny v podkapitole 6.5.1. Po měření drsností povrchu se pokračilo k přípravě metalografických výbrusů.

6.3 Příprava metalografických výbrusů

Pro měření mikrotvrdosti a metalografickou analýzu materiálu v povrchové vrstvě se připravily metalografické výbrusy obrobených segmentů ① a ⑤ (dva z každého). Příprava metalografických vzorků (výbrusů) se skládá z následujících operací: odebrání (nařezání) vzorku materiálu, označení, fixace, broušení, leštění a leptání. Nařezání vzorků se provedlo na metalografické pile s chlazením, aby nedošlo k nežádoucímu tepelnému ovlivnění. Vzorky byly fixovány zalitím (zalisováním) do pryskyřice za tepla v zařízení Struers Citopress-10. Pro následné broušení a leštění se využilo poloautomatické zařízení Struers Tegramin-25.

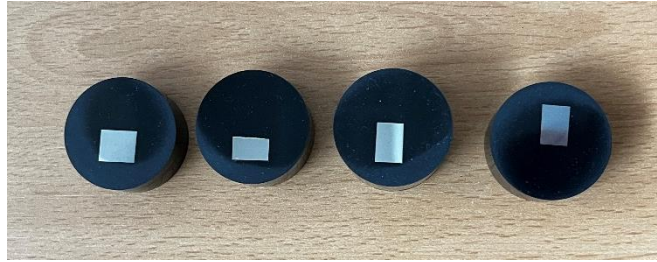


Obrázek 33 - Struers Citopress-10



Obrázek 34 - Struers Tegramin-25

Naleptání vzorků v tomto experimentu proběhlo až po měření mikrotvrdosti. Postup: leptání 15-18 s v leptadlu Nital 4% (kyselina dusičná na alkoholové bázi), oplach ethanolem.



Obrázek 29 - Metalografické výbrusy

6.4 Měření mikrotvrdomosti povrchové vrstvy

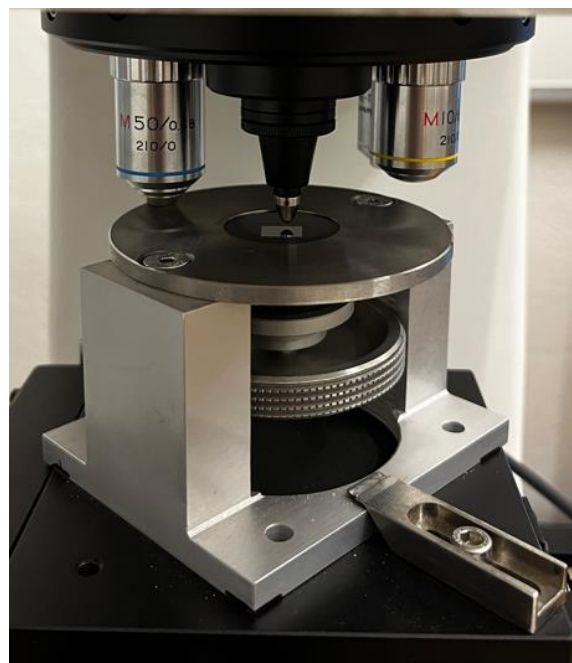
Mikrotvrdomost povrchové vrstvy se měřila pro zjištění, zdali dochází při vyšších řezných rychlostech k výraznému ovlivnění. Hypotéza: povrchová vrstva může být vystavena vysokým teplotám generovaným vysokou řeznou rychlostí. Při velkém ohřátí povrchu by mohlo dojít k popuštění zakalené struktury.

Použité zařízení:

Mikrotvrdoměr FM-100 od společnosti FUTURE-TECH, který disponuje automatickým vnikáním zkušebního tělesa a čtením tvrdostí.



Obrázek 30 - Mikrotvrdoměr FM-100



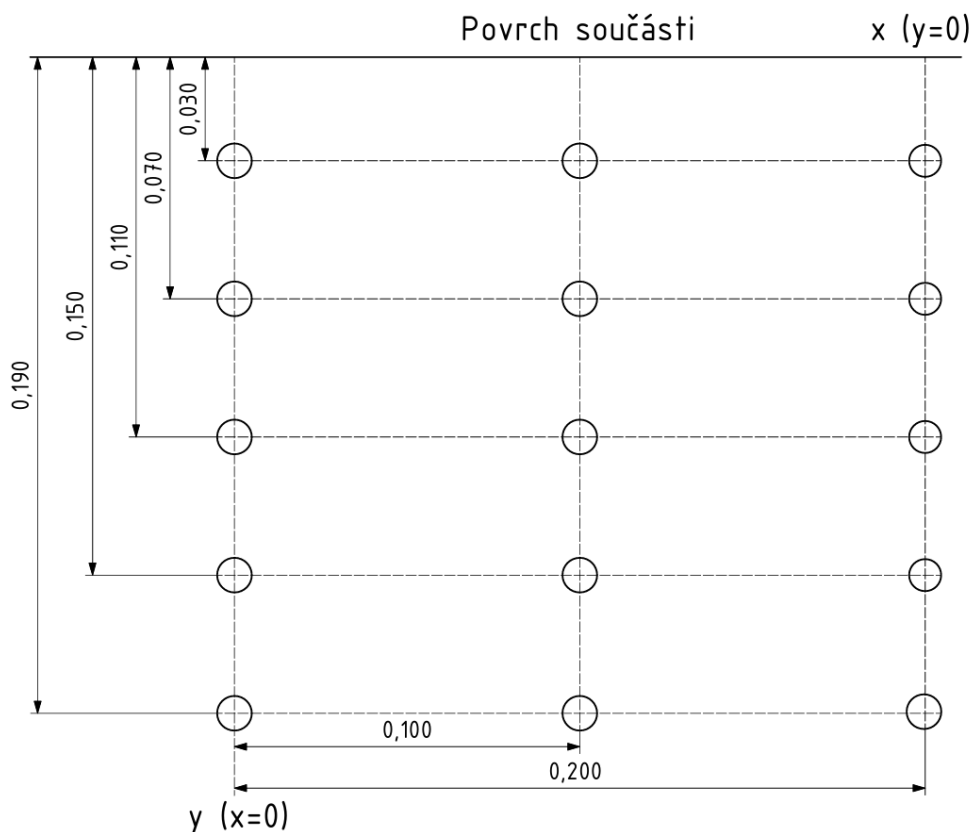
Obrázek 31 - Vnikací těleso mikrotvrdoměru FM-100

Postup a metoda měření:

V připojeném softwaru se vytvořila matice měřených pozic v povrchové vrstvě vzorku. Mikrotvrdoměr následně sám provedl měření mikrotvrdomostí dle

Vickerse s přednastaveným zatížením 100 gf (HV 0,1) a dobou zátěže 10 s v zadaných pozicích včetně vyhodnocení. V posledním kroku bylo nutné manuálně doostřit některé snímky pro přesnější dopočet hodnot.

Matice měřených pozic:



Obrázek 32 - Matice měřených pozic

Pro metodu měření mikrotvrdomosti podle Vickerse jsou normované minimální vzdálenosti mezi sousedními vtisky a mezi vtiskem a okrajem vzorku. Pro oceli se udává minimální vzdálenost mezi vtisky $3 D$ (D = průměrná délka úhlopříčky vtisku). Pro vzdálenost mezi vtiskem a okrajem vzorku se uvádí hodnota $2,5 D$. Tyto doporučené hodnoty nebyly v tomto měření dodrženy. Mezi sousedními vtisky se volila vzdálenost 0,04 mm, mezi povrchem vzorku a vtisky 0,03 mm. Měřený materiál se při zkušebním měření choval jako dostatečně tvrdý s minimální plasticitou, tudíž bylo vyloučeno ovlivnění sousedních vtisků vlivem deformace vnikacím tělesem. Z tohoto důvodu bylo měření mikrotvrdomosti s takovou maticí pozic předpokládáné jako relevantní. Výsledky měření a vyhodnocení jsou uvedeny v podkapitole 6.5.2.

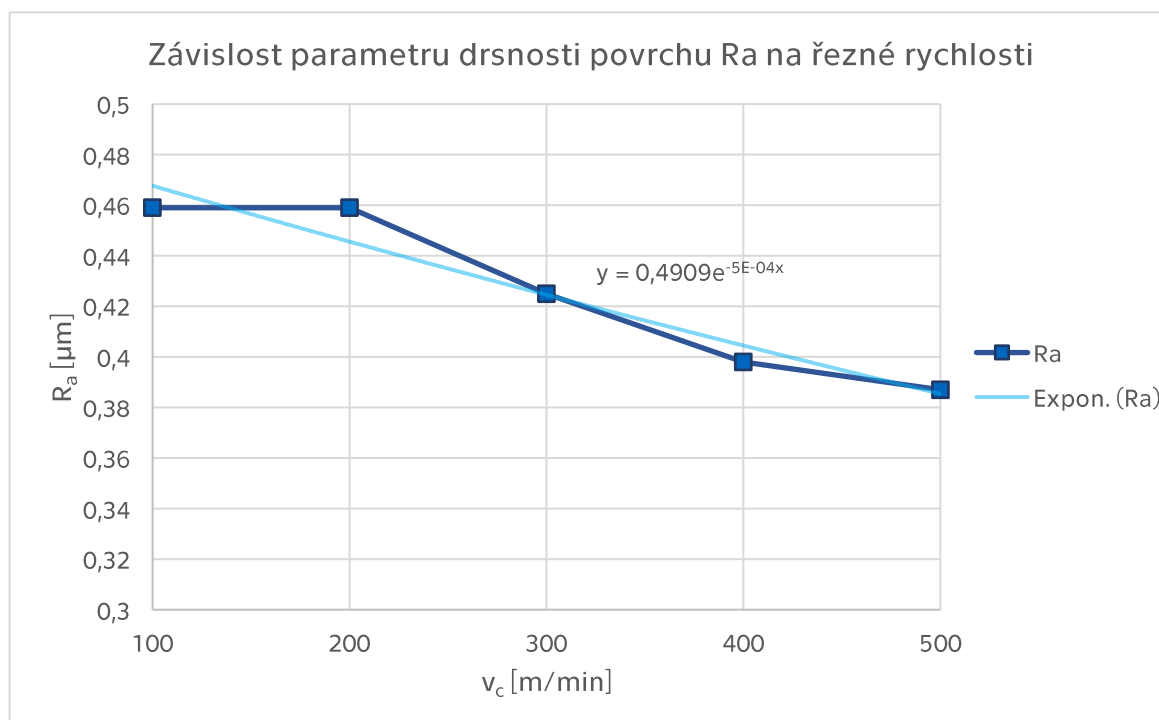
6.5 Naměřené hodnoty a vyhodnocení

6.5.1 Drsnost povrchu

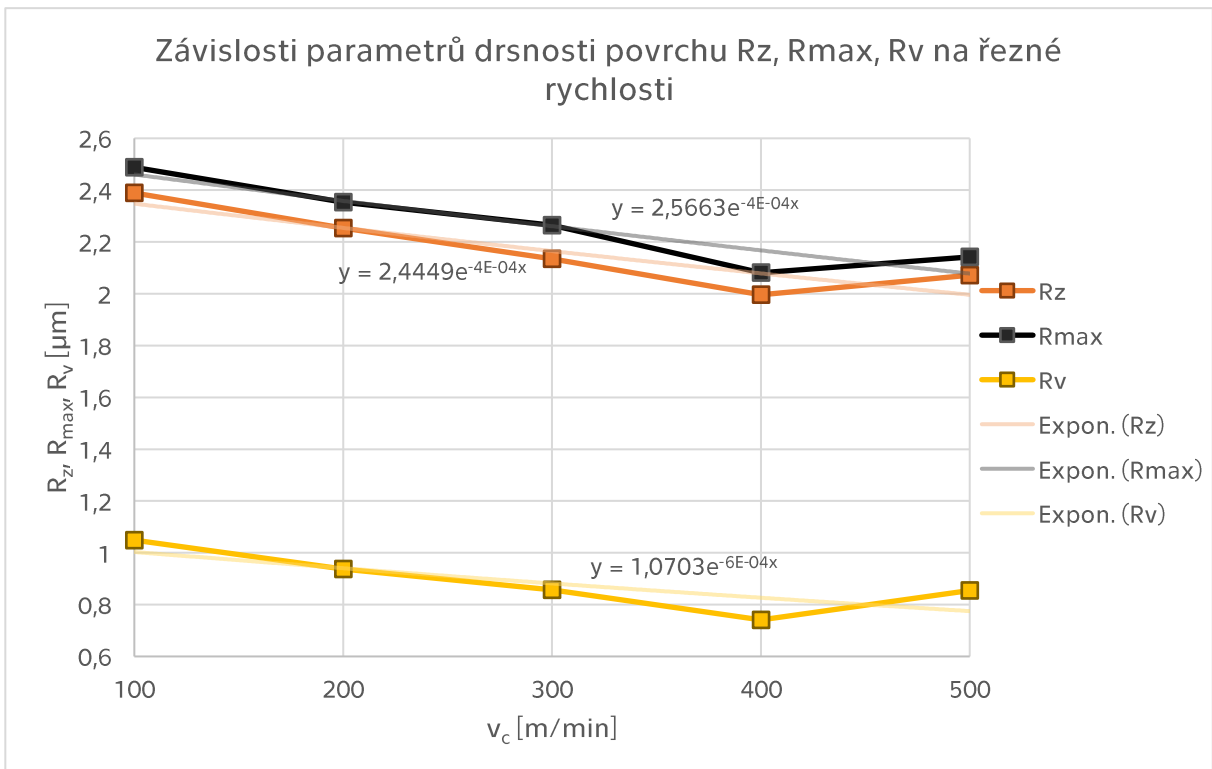
Naměřená závislost parametrů drsnosti povrchu na řezné rychlosti:

Tabulka 12 - Závislost drsnosti povrchu na řezné rychlosti

Segment	v_c [m/min]	R_a [μm]	R_z [μm]	R_{max} [μm]	R_v [μm]
①	100	0,459	2,389	2,488	1,049
②	200	0,459	2,253	2,353	0,937
③	300	0,425	2,135	2,264	0,857
④	400	0,398	1,996	2,081	0,741
⑤	500	0,387	2,072	2,142	0,854



Graf 1 - Závislost parametru drsnosti povrchu R_a na řezné rychlosti



Graf 2 - Závislosti parametrů drsnosti povrchu R_z , R_{max} , R_v na řezné rychlosti

Diskuse:

Z naměřených dat a závislostí vynesných v grafech je patrné, že se zvyšující řeznou rychlostí je dosaženo lepších parametrů drsnosti povrchu. Všechny parametry mají s růstem řezné rychlosti klesající trend. To odpovídá tvrzení, že nejlepší integrity povrchu je dosaženo při nízkých hloubkách řezu, nízkých posuvech a vysokých řezných rychlostech. Vysoké řezné rychlosti však mohou negativně ovlivňovat opotřebení a životnost nástroje.

Drsnostní profily obrobených segmentů uvedené v protokolech měření (Seznam příloh) ukazují pravidelný periodický povrch. I po vizuálním zhodnocení bylo zřejmé, že tvrdým soustružením lze dosáhnout poměrně dobré drsnosti povrchu i s použitím běžných a levných CBN destiček.

6.5.2 Mikrotvrđost

Vysvětlivky: X,Y [mm] – souřadnice v matici měřených pozic (kladná osy y směřuje z povrchu do jádra součásti);

D1,D2 [μm] – úhlopříčky vtisku;

D [μm] – průměrná délka úhlopříčky;

HV 0,1 a HRC – tvrdosti.

Naměřená mikrotvrđost na segmentu ① ($v_c = 100$ m/min) v matici pozic:

Tabulka 13 - Naměřená mikrotvrđost na segmentu ①

X [mm]	Y [mm]	D1 [μm]	D2 [μm]	D [μm]	HV 0,1	HRC
0,000	0,030	16,82	18,25	17,54	603,20	55,46
0,100	0,030	17,00	17,87	17,44	610,09	55,84
0,200	0,030	17,72	18,63	18,18	561,54	53,09
0,200	0,070	16,28	17,02	16,65	668,99	58,76
0,100	0,070	16,10	17,02	16,56	676,28	59,10
0,000	0,070	16,10	16,64	16,37	691,99	59,78
0,000	0,110	15,74	16,74	16,24	703,34	60,28
0,100	0,110	16,91	17,97	17,44	609,92	55,83
0,200	0,110	16,37	17,02	16,70	665,39	58,59
0,200	0,150	16,28	16,83	16,56	676,66	59,12
0,100	0,150	17,18	17,78	17,48	607,11	55,67
0,000	0,150	16,82	17,49	17,16	630,09	56,85
0,000	0,190	16,28	16,83	16,56	676,66	59,12
0,100	0,190	16,73	17,49	17,11	633,41	57,02
0,200	0,190	16,46	17,68	17,07	636,41	57,17

Průměrné mikrotvrđosti v hloubkách měřených pozic na segmentu ①:

Tabulka 14 - Průměrné mikrotvrđosti na segmentu ①

Y [mm]	Ø HV 0,1	Ø HRC
0,030	591,61	54,80
0,070	679,09	59,21
0,110	659,55	58,23
0,150	637,95	57,21
0,190	648,83	57,77
Ø ①	643,41	57,45

Naměřená mikrotvrdost na segmentu ⑤ ($v_c = 500 \text{ m/min}$) v matici pozic:

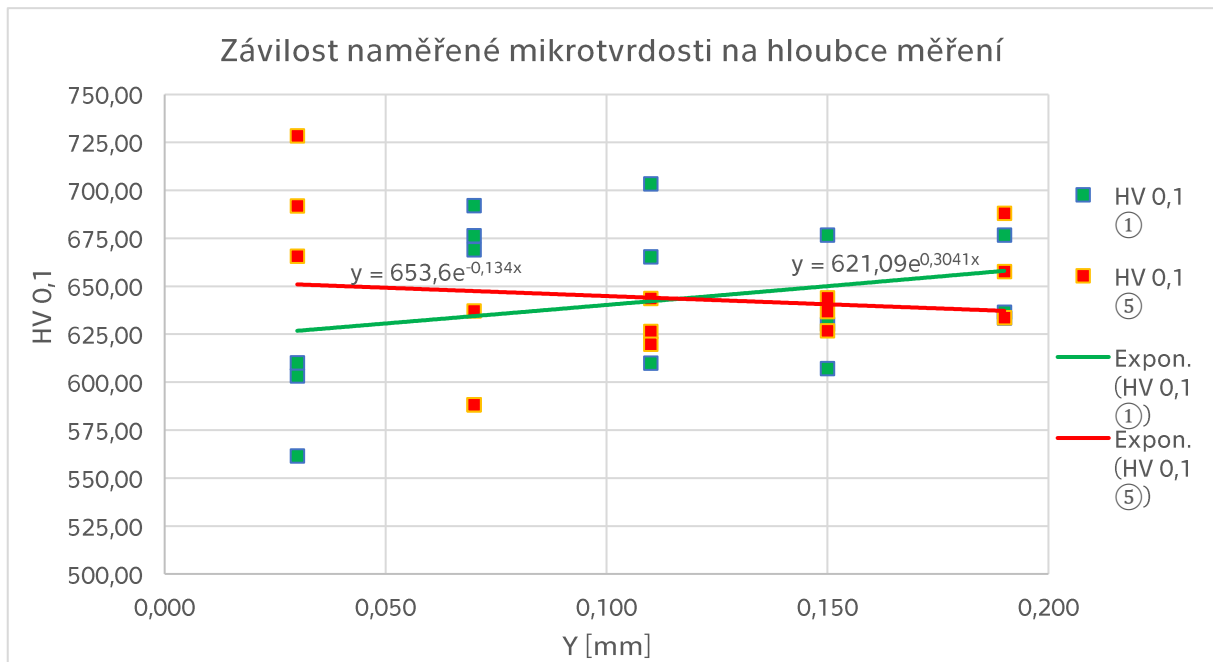
Tabulka 15 - Naměřená mikrotvrdost na segmentu ⑤

X [mm]	Y [mm]	D1 [μm]	D2 [μm]	D [μm]	HV 0,1	HRC
0,000	0,030	16,46	16,93	16,70	665,58	58,6
0,100	0,030	15,65	16,26	15,96	728,36	61,32
0,200	0,030	16,01	16,74	16,38	691,80	59,77
0,200	0,070	16,82	17,30	17,06	637,10	57,21
0,100	0,070	17,36	18,16	17,76	588,18	54,62
0,000	0,070	17,36	18,16	17,76	588,18	54,62
0,000	0,110	16,73	17,68	17,21	626,47	56,67
0,100	0,110	16,55	17,40	16,98	643,69	57,53
0,200	0,110	16,82	17,78	17,30	619,80	56,34
0,200	0,150	16,91	17,49	17,20	626,80	56,69
0,100	0,150	16,64	17,49	17,07	636,75	57,19
0,000	0,150	16,64	17,30	16,97	643,87	57,54
0,000	0,190	16,19	17,40	16,80	657,55	58,22
0,100	0,190	16,82	17,40	17,11	633,58	57,03
0,200	0,190	16,10	16,74	16,42	688,01	59,61

Průměrné mikrotvrdosti v hloubkách měřených pozic na segmentu ⑤:

Tabulka 16 - Průměrné mikrotvrdosti na segmentu ⑤

Y [mm]	Ø HV 0,1	Ø HRC
0,03	695,25	59,90
0,07	604,49	55,48
0,11	629,99	56,85
0,15	635,81	57,14
0,19	659,71	58,29
Ø ⑤	645,05	57,53



Graf 3 - Závislost naměřené tvrdosti HV 0,1 na hloubce měření

Diskuse:

Naměřené hodnoty mikrotvrdomosti po obrobení řeznou rychlostí $v_c = 500$ m/min nevykazují žádný pokles mikrotvrdomosti směrem k povrchu v hloubce 0,030-0,190 mm pod povrchem. Na segmentu ① byla dokonce v hloubce 0,030 mm pod povrchem naměřena vyšší průměrná mikrotvrdomost než na segmentu ⑤. Tímto byla hypotéza o výrazném snížení mikrotvrdomosti při vysoké řezné rychlosti vyvrácena. Důvodem mohlo být nedostatečné množství přivedeného tepla do součásti. To by potvrdovalo předpoklad, že drtivá většina tepla odchází s třískou. Pro přesné zjištění vlivů řezné rychlosti na mikrotvrdomost by muselo být provedeno rozsáhlejší a detailnější měření.

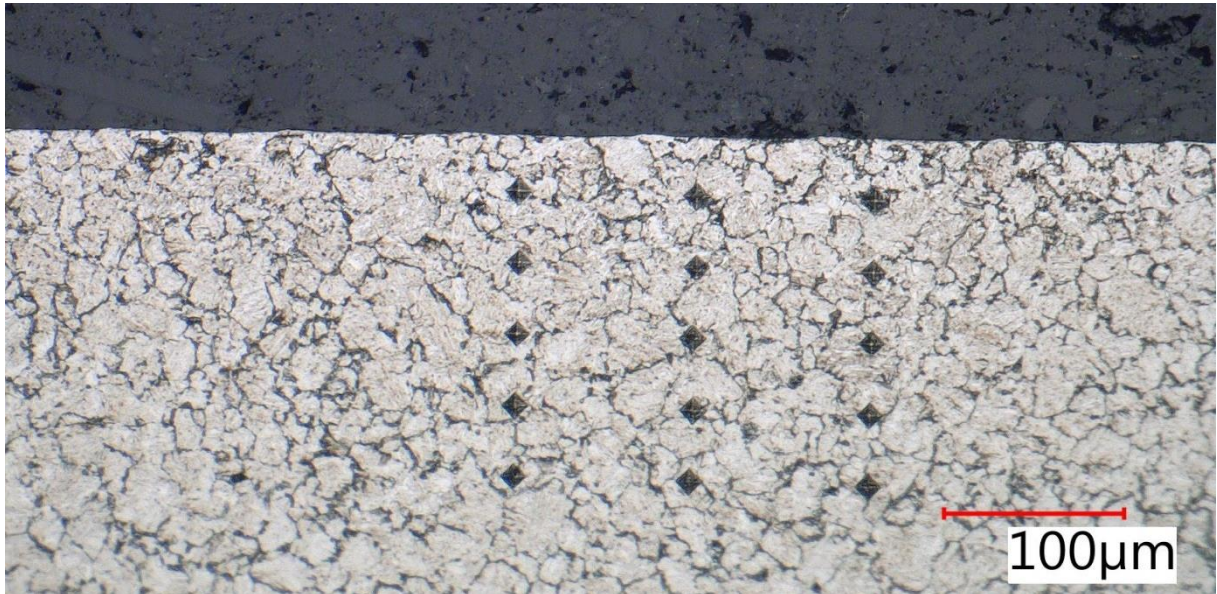
Ovlivnění povrchu součásti bylo vyzorováno pouze ve velmi malé hloubce, kterou tento rozsah měření neobsáhl (viz Metalografie).

Z průměrných hodnot lze určit orientační tvrdost celé povrchové vrstvy součásti č. 1. Tato tvrdost dosahuje v průměru 644,23 HV 0,1. Ekvivalentní hodnotou této tvrdosti je 57,49 HRC. Podle dosažené tvrdosti v povrchové vrstvě byla součást č. 1 správně zakalená, tudíž byl předpoklad tvrdého soustružení naplněn. Podobné vlastnosti se mohou očekávat i u součásti č. 2.

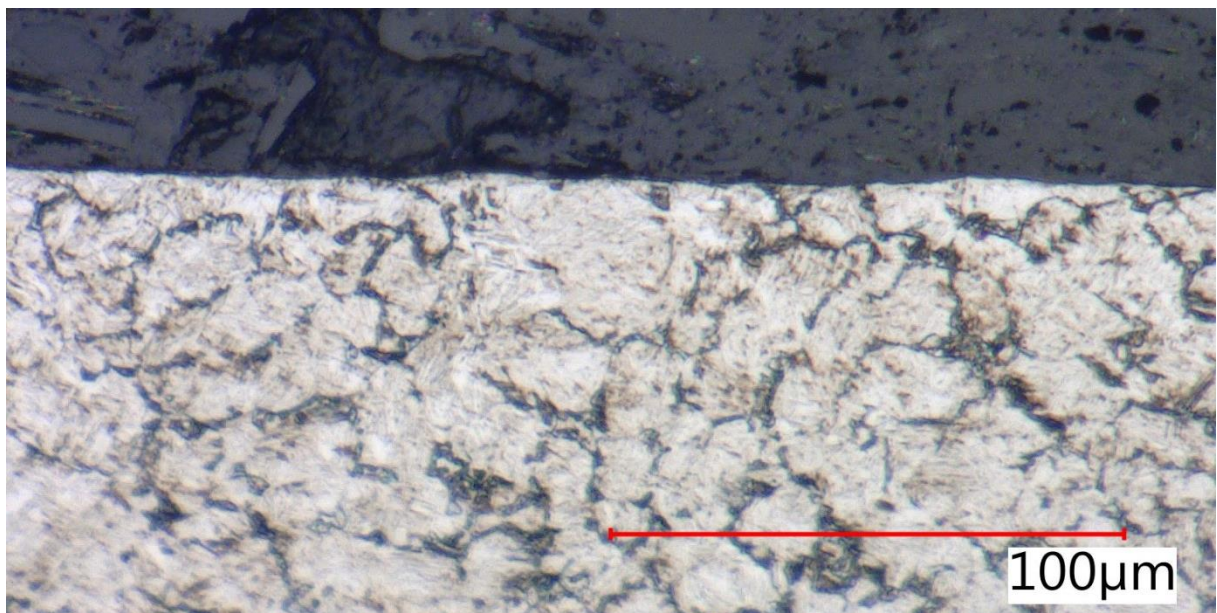
6.6 Metalografie

Metalografické snímky byly pořízeny na mikroskopu Keyence VH-ZST s digitálním zvětšením (Z) až 2000x.

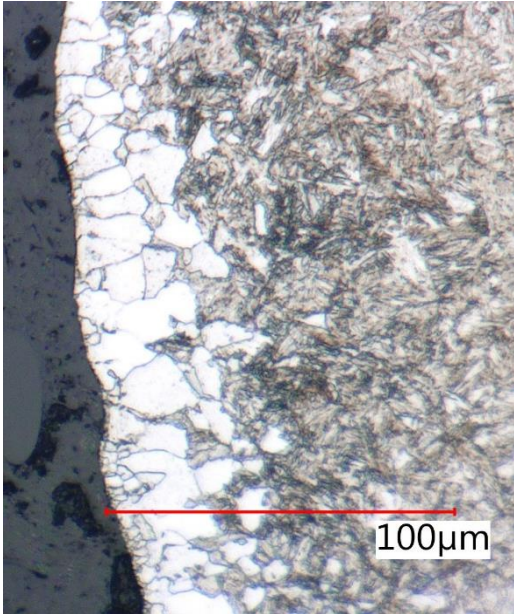
Segment ① ($v_c = 100 \text{ m/min}$)



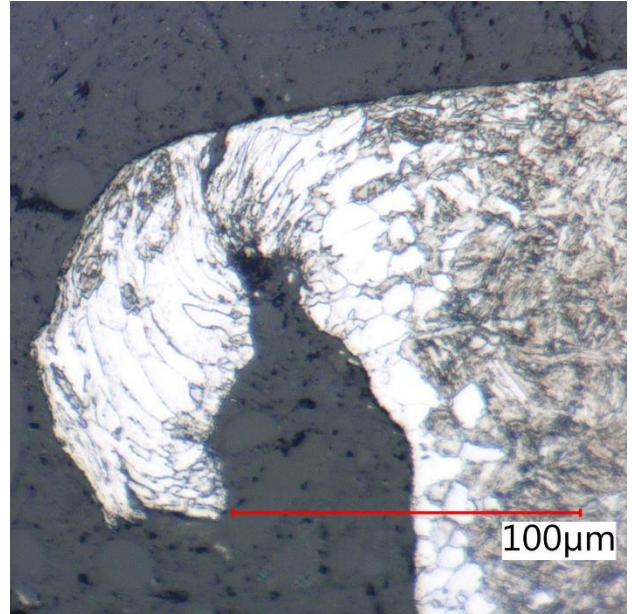
Obrázek 33 - Segment ① - Vtisky po měření mikrotvrdosti + struktura povrchové vrstvy



Obrázek 34 - Segment ① - Zvětšený detail povrchu

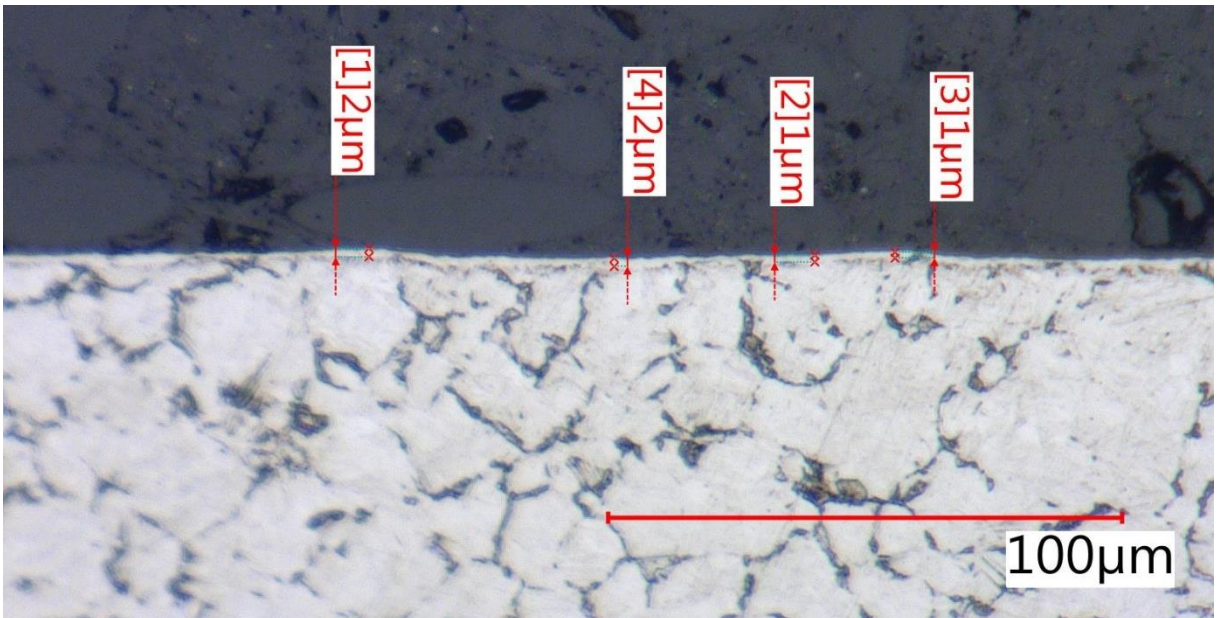


Obrázek 41 - Segment ① - Povrch neobrobeného čela



Obrázek 42 - Segment ① - Otřep na neobrobeném čele

Segment ⑤ ($v_c = 500$ m/min)



Obrázek 35 - Segment ⑤ - Zvětšený detail povrchu

Diskuse:

Na metalografických snímcích lze pozorovat martenzitickou strukturu s viditelnými martenzitickými jehlicemi. Přítomný martenzit reprezentuje nerovnovážnou strukturní složku vzniklou kalením.

Metalografický snímek segmentu ⑤ nevykresluje martenzitickou strukturu v takové kvalitě zobrazení jako snímky segmentu ①. Příčinou může být nedokonalá příprava metalografického výbrusu. Vzorky byly nejspíše špatně neleptány.

Celková struktura materiálu se jeví jako jemnozrná. Při tepelném zpracování nedošlo k nežádoucímu růstu zrn, což vypovídá o správném zvolení kalící teploty a doby výdrže.

Na ploše čela, které nebylo po kalení obrobena, je viditelné oduhličení vlivem vystavení vysoké teplotě při ohřevu součástí.

Při soustružení řeznou rychlostí $v_c = 500$ m/min došlo vlivem generování vysokých teplot k natavení povrchové vrstvy. Tloušťka vrstvy se pohybuje přibližně v rozmezí 1-2 μm . Na segmentu soustruženém řeznou rychlostí $v_c = 100$ m/min k tomuto jevu nedošlo.

7. ANALÝZA ŘEZNÝCH SIL PŘI TVRDÉM SOUSTRUŽENÍ V ZÁVISLOSTI NA ŘEZNÉ RYCHLOSTI

Druhá část experimentu se věnuje analýze řezných sil v závislosti na řezné rychlosti. Analýza měla ukázat, jaké složky řezné síly dominují při obrábění tvrdých materiálů a jakým způsobem jsou ovlivněny změnou řezné rychlosti.

7.1 Měření řezných sil

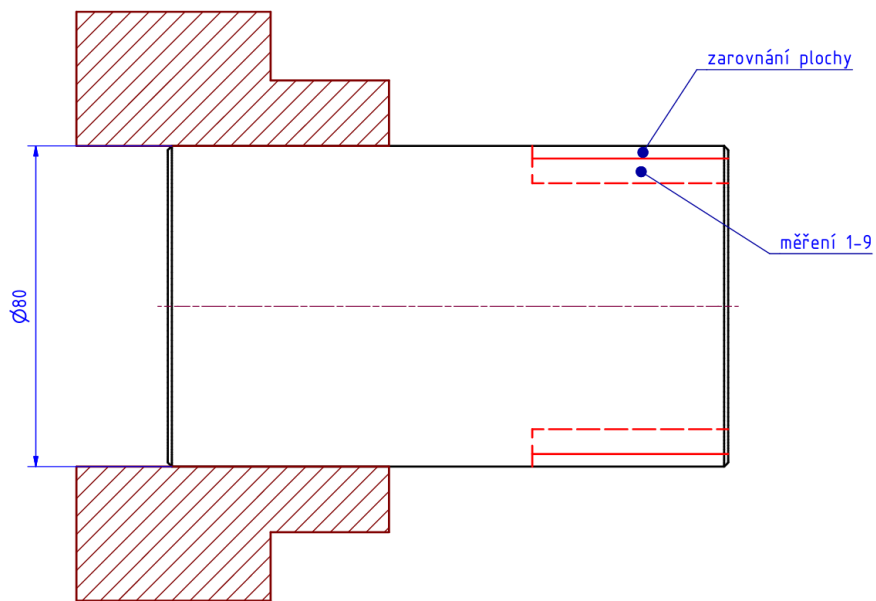
Řezné síly byly měřeny při obrábění zakalené součásti č. 2 ($\varnothing 80$ mm) na konvenčním soustruhu TOS SU 50/1500 s připojeným dynamometrem Kistler 9265B, který ukládal naměřená data do softwaru DynoWare. VBD se použila stejná jako u soustružení součásti č. 1 pro analýzu integrity povrchu (Tabulka 8).



Obrázek 36 - Konvenční soustruh TOS SU 50/1500 s dynamometrem

V přípravné fázi se na upnuté součásti zarovnávala potřebná rotační plocha. Následná analýza řezných sil spočívala v devíti měřeních, přičemž v každém měření proběhla změna řezných podmínek. Volbu řezných rychlostí limitovalo manuální nastavení otáček vřetene.

Schéma:



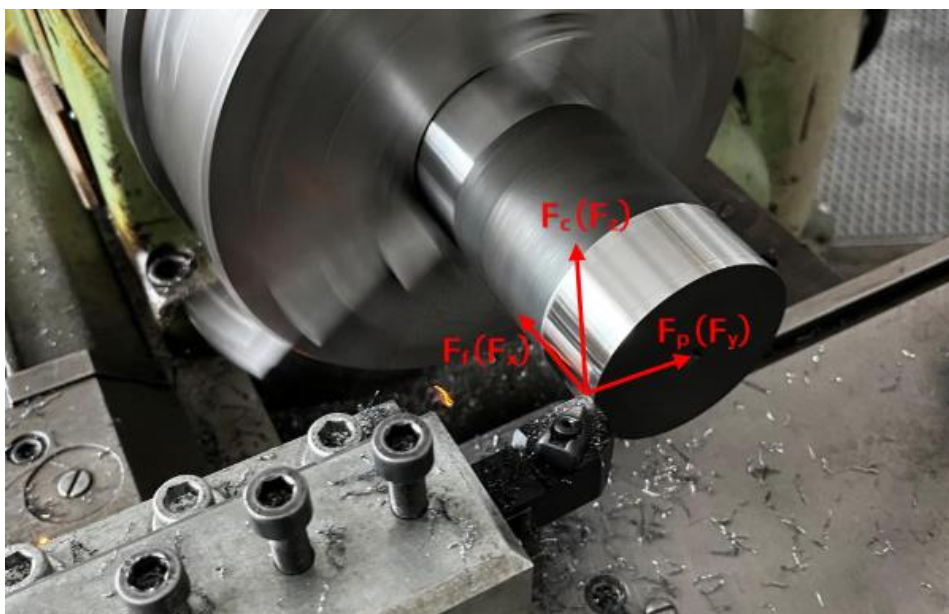
Obrázek 37 - Schéma měření řezných sil

Řezné podmínky:

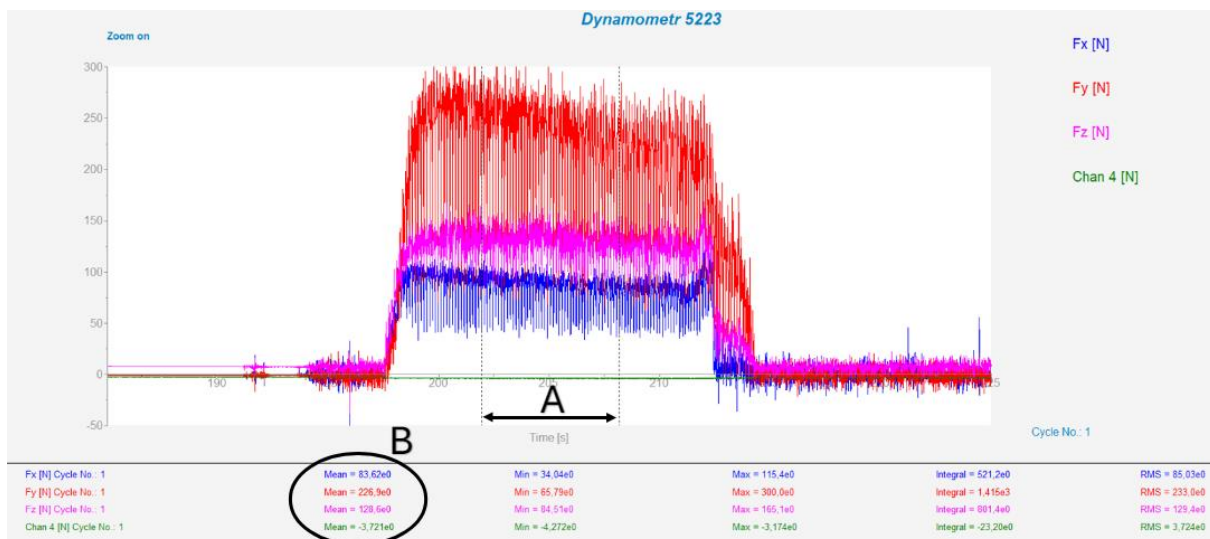
Tabulka 17 - Řezné podmínky pro měření řezných sil

Číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f [mm/ot.]	0,1								
a_p [mm]	0,1					0,2			
v_c [m/min]	109	135	171	216	268	107	133	167	211

Způsob měření:



Obrázek 38 - Souřadný systém působících složek sil

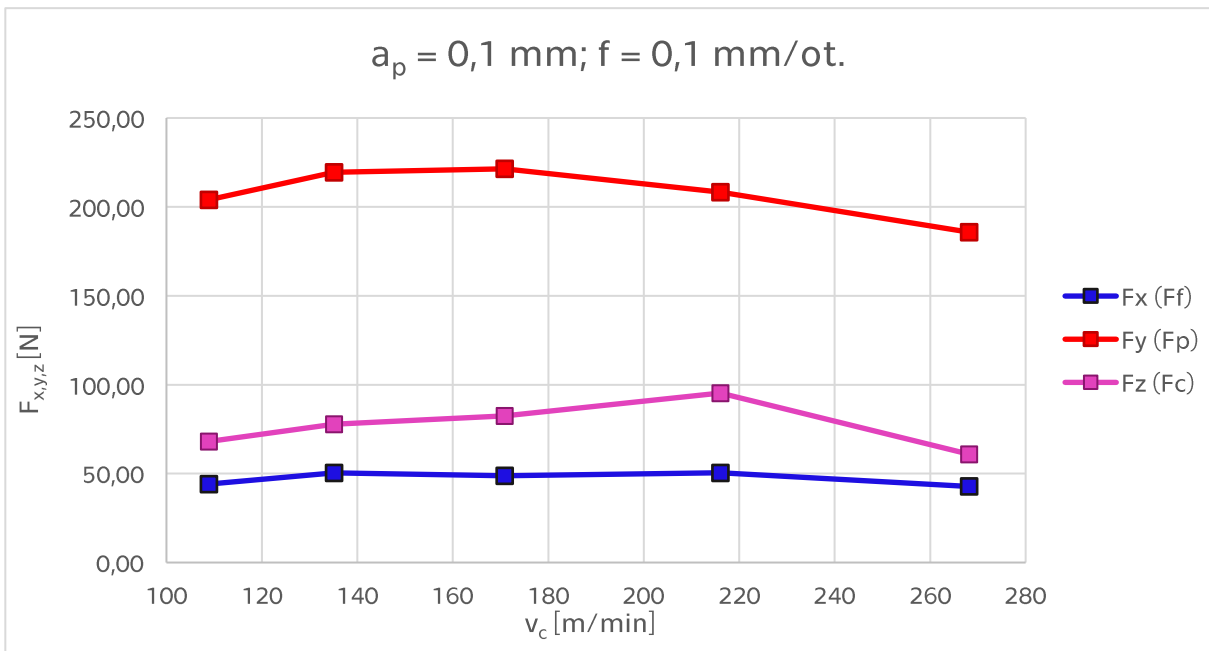


Obrázek 47 - Vyhodnocení měření sil: A = vyhodnocená ustálená oblast; B = průměrné hodnoty

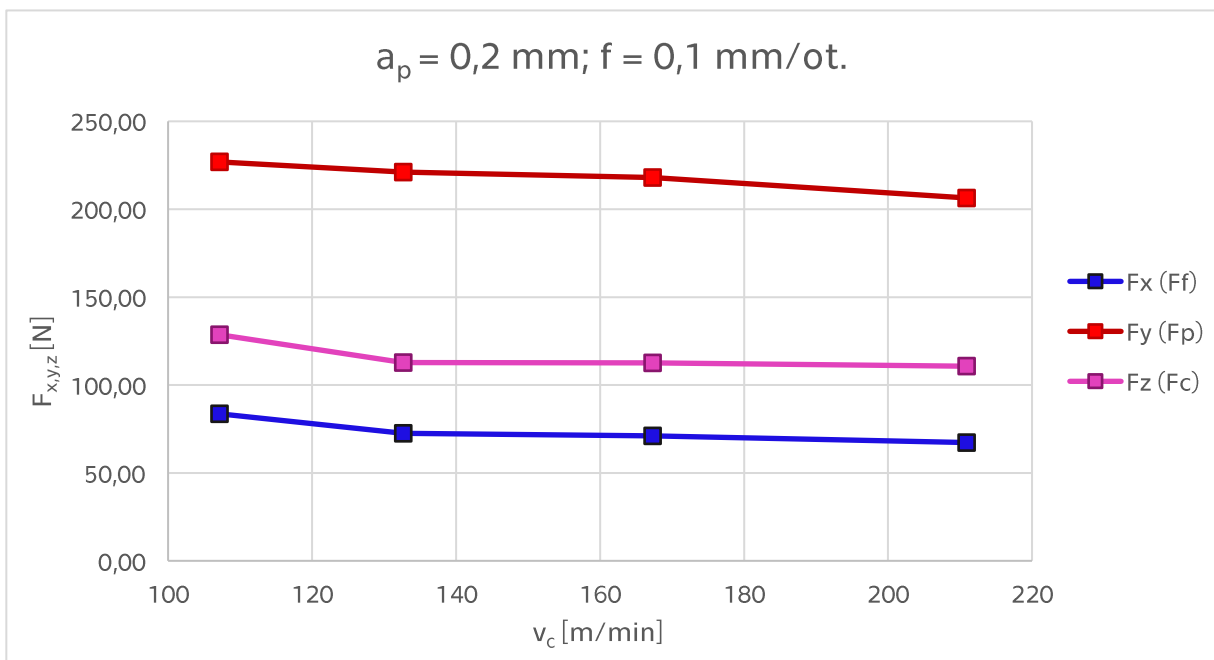
7.2 Naměřené hodnoty a vyhodnocení

Tabulka 18 - Naměřené složky sil v závislosti na řezné rychlosti

Číslo měření	f [mm/ot.]	a_p [mm]	v_c [m/min]	$F_x (F_f)$ [N]	$F_y (F_p)$ [N]	$F_z (F_c)$ [N]
1	0,1	0,1	109	44,16	204,00	68,08
2			135	50,36	219,50	77,70
3			171	48,75	221,40	82,51
4			216	50,48	208,30	95,30
5			268	42,78	185,80	60,95
6		0,2	107	83,62	226,90	128,60
7			133	72,57	221,20	112,70
8			167	70,99	218,10	112,60
9			211	67,28	206,40	110,70



Graf 4 - Závislost složek řezné síly na řezné rychlosti při $a_p = 0,1 \text{ mm}; f = 0,1 \text{ mm/ot.}$



Graf 5 - Závislost složek řezné síly na řezné rychlosti při $a_p = 0,2 \text{ mm}; f = 0,1 \text{ mm/ot.}$

Diskuse:

Naměřené složky řezné síly ukazují jen velmi malý vliv řezné rychlosti. Při skokové změně řezné rychlosti se velikost řezných sil mění jen nepatrně.

Nejméně ovlivněnou složkou je posuvová síla F_f . Přesnější data rozptýlenosti složek sil v závislosti na řezné rychlosti popisují směrodatné odchylky:

Tabulka 19 - Směrodatné odchylky složek řezné síly

f [mm/ot.]	0,1	
a_p [mm]	0,1	0,2
v_c [m/min]	109-268	107-211
$\sigma(F_f)$ [N]	3,22	6,09
$\sigma(F_p)$ [N]	12,81	7,48
$\sigma(F_c)$ [N]	11,86	7,23

Změna hloubky řezu z hodnoty 0,1 mm na 0,2 mm přinesla větší ovlivnění velikosti sil (především F_f , F_c) než změna řezných rychlostí v celém rozsahu. Teoretický předpoklad o zanedbatelném vlivu řezné rychlosti z kapitoly 2.2 (*Řezné síly při soustružení*) byl potvrzen.

Tabulka 20 – Naměřené průměry velikostí složek řezné síly

Složka řezné síly	$F_x (F_f)$	$F_y (F_p)$	$F_z (F_c)$
$\bar{\sigma}$ [N]	59,00	212,40	94,35

Jednoznačně nejvýznamnější a největší složkou řezné síly při tvrdém soustružení je pasivní síla (F_p). Pasivní síla působící v radiálním směru má snahu vytlačit nástroj ze záběru, čímž způsobuje průhyb a chvění obrobku. Její průměrná velikost se při obrábění pohybovala z velké části nad hranicí 200 N. Lze konstatovat, že tvrzení o nutném používání tuhých strojů a nástrojů pro přesné soustružení tvrdých materiálů je pravdivé.

8. ZÁVĚR

Bakalářská práce zaměřená na problematiku tvrdého soustružení shrnuje ve své rešeršní části důležité teoretické poznatky nutné k pochopení podstaty tohoto typu soustružení. Velká část je věnována charakteristice integrity povrchu a obecným předpokladům pro úspěšné soustružení tvrdých materiálů s tvrdostí nad 45 HRC.

V rámci bakalářské práce byl proveden experiment za účelem zjištění vlivů řezné rychlosti na silové působení a dosaženou integritu povrchu. Materiál součástí, na kterých byla provedena analýza těchto vlivů při obrábění, představovala kalená ocel C45E.

Analýza integrity povrchu na obrobeném dílu ukázala významný vliv řezné rychlosti na drsnost povrchu. Všechny měřené parametry R_a , R_z , R_{max} a R_v mají se zvyšující řeznou rychlostí klesající trend. Protokoly z měření (*Seznam příloh*) ukazují u všech rychlostí pravidelný periodický profil drsnosti. Nejlepší drsnost povrchu $R_a = 0,387 \mu\text{m}$ vykazuje úsek obrobený řeznou rychlostí $v_c = 500 \text{ m/min}$. Patrné zlepšení drsnosti povrchu při vyšších řezných rychlostech může ovšem doprovázet zkrácená doba životnosti VBD.

Měření mikrotvrdosti v povrchové vrstvě potvrdilo předpokládanou tvrdost obráběných dílů po vlastním tepelném zpracování. Průměrná tvrdost v hloubce 0,030-0,190 mm pod povrchem sahá k hranici 57,5 HRC. Mikrotvrdost se měřila pouze na obrobených segmentech řeznou rychlostí $v_c = 100 \text{ m/min}$ a $v_c = 500 \text{ m/min}$, jelikož při soustružení nebyly na pohled registrovány žádné podstatné změny, které by se mohly týkat drastického růstu teploty v místě řezu vlivem zvýšení řezné rychlosti. Po vyhodnocení výsledků měření byla vyvrácena hypotéza o snížení tvrdosti vlivem možného popuštění povrchu (v měřeném rozsahu 0,030-0,190 mm pod povrchem).

Metalografické snímky pořízené na mikroskopu vykreslují martenzitickou strukturu vzniklou kalením. Jemnozrná struktura v povrchu vzorků vypovídá a správné volbě parametrů tepelného zpracování. Na neobrobené ploše čela po kalení bylo možné spatřit ukázkové oduhličení vrstvy vlivem vystavení součásti

vysoké teplotě. Metalografická analýza vzorku povrchu po obrobení řeznou rychlostí $v_c = 500$ m/min ukázala přítomnost natavené vrstvy o hloubce 1-2 μm . Tato vrstva nemusí mít požadované mechanické vlastnosti a může být náchylná k vylamování. K natavení vrstvy došlo vlivem generované teploty při vysoké řezné rychlosti.

V poslední části práce proběhla analýza silového působení s měřením složek řezných sil. Naměřená velikost pasivní složky síly (F_p) byla jednoznačně nejvíce dominantní a přesahovala hranici 200 N při řezných podmínkách $v_c = 107\text{-}216$ m/min; $a_p = 0,1\text{-}0,2$ mm; $f = 0,1$ mm. Významné působení pasivní síly potvrzuje nutnost využívání tuhých strojů a nástrojů při tvrdém soustružení. Se zvyšující řeznou rychlostí došlo podle předpokladu pouze k zanedbatelnému ovlivnění řezných sil.

Reference

- [1] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2007, c1999. ISBN 9788001037522.
- [2] DAVIM, J. P., ed. *Modern machining technology: a practical guide*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. Woodhead Publishing in mechanical engineering. ISBN isbn978-0-85709-099-7.
- [3] *Příručka pro technology - Jak je to s řeznými silami?* [online]. MM Průmyslové spektrum, 2012 [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-je-to-s-reznyymi-silami>
- [4] HAMDÍ AOUCI, MOHAMED ATHMANE YALLESE, KAMEL CHAOUI, TAREK MABROUKI, JEAN-FRANÇOIS RIGAL. *Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool: Prediction model and cutting conditions optimization, Measurement* [online]. 2012, 45(3), 344-353 [cit. 2024-04-21]. ISSN 0263-224. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.11.011>
- [5] MÁDL, Jan a Jaroslav BARCAL. *Základy technologie II*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2610-8.
- [6] *Soustružnický nůž - základní geometrie* [online]. [cit. 2024-05-09]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Soustru%C5%BEnick%C3%BD__n%C5%AF%C5%BE2.jpg
- [7] DR.-ING. PLÁNIČKA, František. PKD a CBN nástroje. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012, (9) [cit. 2023-11-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pkd-a-cbn-nastroje>
- [8] Řezná keramika a kubický nitrid boru. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2003, (9) [cit. 2023-11-25]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rezna-keramika-a-kubicky-nitrid-boru>
- [9] *Značení nožů s VBD dle ISO* [online]. [cit. 2024-05-09]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Zna%C4%8Den%C3%ADA.jpg>
- [10] *Značení VBD - kód ISO* [online]. [cit. 2024-05-09]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Zna%C4%8Den%C3%AD__VBD.jpg
- [11] SANDVIK CZ S.R.O. *Volba vhodných soustružnických břitových destiček* [online]. [cit. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/how-to-choose-correct-turning-insert>
- [12] Nástroje pro obrábění kovů. *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2024-04-17]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/tools>
- [13] BARTARYA, Gaurav a S.K. CHOUDHURY. State of the art in hard turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2012, 53(1), 1-14. ISSN 0890-6955.

- [14] CH. SATEESH, Kumar a Kumar Patel SAROJ. Application of surface modification techniques during hard turning: Present work and future prospects. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2018, **76**, 112-127. ISSN 0263-4368.
- [15] SANDVIK CZ S.R.O. *Obráběné materiály* [online]. [cit. 2023-11-30]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece-materials>
- [16] *Katalog Dormer Pramet - SOUSTRUŽENÍ 2021-2022* [online]. [cit. 2024-04-29]. Dostupné z: <https://5wyuco84ao39w9tsgkkmnmx.blob.core.windows.net/cms/DORMER-PRAMET-Turning-Catalogue-2021-CZ.pdf>
- [17] GOSIGER. *FUNDAMENTALS OF HARD TURNING: An Indepth Look at the Process* [online]. 2012 [cit. 2023-11-22]. Dostupné z: https://cdn2.hubspot.net/hub/139128/file-17761415-pdf/docs/gos_wp_hardturning_f.pdf
- [18] HE, Kang, Mengdi GAO a Zhuanzhe ZHAO. Soft Computing Techniques for Surface Roughness Prediction in Hard Turning: A Literature Review. *IEEE Access* [online]. 2019, **7**, 89556-89569 [cit. 2023-11-23]. ISSN 2169-3536. Dostupné z: doi:10.1109/ACCESS.2019.2926509
- [19] DINIZ, Anselmo Eduardo a Adilson JOSÉ DE OLIVEIRA. Hard turning of interrupted surfaces using CBN tools. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008, **195**(1-3), 275-281. ISSN 0924-0136.
- [20] CANADIAN METALWORKING. *Hard Turning - Examining the machining of prehardened materials* [online]. 2011 [cit. 2024-02-07]. Dostupné z: <https://www.canadianmetalworking.com/canadianindustrialmachinery/article/management/-hard-turning->
- [21] GINTING, A., R. SKEIN, D. CUACA, HERDIANTO, PIETER a Z. MASYITHAH. The characteristics of CVD- and PVD-coated carbide tools in hard turning of AISI 4340. *Measurement* [online]. 2018, **129**, 548-557 [cit. 2024-02-10]. ISSN 0263-2241. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.072>.
- [22] SAMANTARAYA, Debabrata a Sanjay LAKADE. Hard Turning Cutting Tool Materials used in Automotive and Bearing Manufacturing Applications – A review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2020, 2020-03-01, **814**(1) [cit. 2023-11-25]. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-898X/814/1/012005
- [23] SANDVIK CZ S.R.O. *Nástrojové materiály* [online]. [cit. 2023-12-22]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting-tool-materials>
- [24] KAKÁČ, Martin. *SLINUTÉ KARBIDY PRO OBRÁBĚNÍ KOROZIVZDORNÝCH OCELÍ*. Brno, 2014. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [25] NAYAK, Hardik B. a K. B. RATHOD. A new method of hard turning of hardened workpieces: A review. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2023, **82**, 356-362

[cit. 2024-02-09]. ISSN 2214-7853. Dostupné z:
doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.432>

- [26] BOING, Denis. Tool wear rate of the PCBN, mixed ceramic, and coated cemented carbide in the hard turning of the AISI 52100 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2019, **104**, 4697–4704 [cit. 2024-02-09]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s00170-019-04295-9>
- [27] PORUBSKÝ, Jaroslav. ŠKODA AKADEMIE. *KNVF - ŘEZNÉ PODMÍNKY PŘI OBRÁBĚNÍ* [online]. 2017 [cit. 2023-12-22]. Dostupné z:
<https://az749841.vo.msecnd.net/sitescszcsou/alv1/5acc43e2-4b7d-4d0e-ad8d-407526016e71/Rezne-podminky-pri-obrabeni.f1029a8cc71987e310d080ceb061141f.pdf>
- [28] SANDVIK CZ S.R.O. *Jak při soustružení dosáhnout dobré kvality obrobených součástí* [online]. [cit. 2023-12-23]. Dostupné z:
<https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/how-to-achieve-good-component-quality-in-turning>
- [29] KUS, Abdil, Yahya ISIK, M. CAKIR, Salih COŞKUN a Kadir ÖZDEMİR. Thermocouple and Infrared Sensor-Based Measurement of Temperature Distribution in Metal Cutting. *Sensors* [online]. 2015, **15**(1), 1274-1291 [cit. 2023-12-23]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:[10.3390/s150101274](https://doi.org/10.3390/s150101274)
- [30] AINUSYAFIQA, Pay Jun Liew, Ainusyafiqah Shaaroni JIWANG, Nor Azwadi Che Sidik a Jiwang Yan. An overview of current status of cutting fluids and cooling techniques of turning hard steel. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 2017, **114**, 380-394 [cit. 2023-12-22]. ISSN 0017-9310. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.077>
- [31] HOLLY B., Martin. *Turning the hard way* [online]. 2021 [cit. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://www.ctemag.com/news/articles/turning-hard-way>
- [32] OSTRAVSKÁ UNIVERZITA. *Základní soustružnické nože a jejich popis* [online]. [cit. 2023-12-30]. Dostupné z:
<https://www.osu.cz/dokumenty/proportal/pdf/kpv/soustruzeni/lekce3.htm>
- [33] KOEPFER, CHRIS. *Tooling Up For Hard Turning* [online]. 2005 [cit. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://www.productionmachining.com/articles/tooling-up-for-hard-turning>
- [34] F. C. SOUSA, Vitor a Francisco J. G. SILVA. Recent Advances in Turning Processes Using Coated Tools—A Comprehensive Review. *Metals* [online]. 2020, **10**(2), 170 [cit. 2024-01-02]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/met10020170>
- [35] BOBZIN, Kirsten. High-performance coatings for cutting tools. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* [online]. 2017, **18**, 1-9 [cit. 2024-01-02]. ISSN 1755-5817. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.11.004>
- [36] BORO VAN, Petr. Tvrdé soustružení a přesné broušení na jednom stroji. *Technický týdeník* [online]. 2022 [cit. 2024-01-13]. Dostupné z: <https://www.technickytydenik.cz/rubriky/obrabeci-stroje-a-jejich->

prislusenstvi/tvrde-soustruzeni-a-presne-brouseni-na-jednom-stroji_57203.html

- [37] *Výzkum pro praxi: Soustružnické stroje pro náročnou a přesnou výrobu* [online]. 2022, 9 [cit. 2024-01-13]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyzkum-pro-praxi-soustruznicke-stroje-pro-narocnou-a-presnou-vyrobu>
- [38] MASCHINEN WAGNER. *Objevte naši nabídku produktů* [online]. [cit. 2024-02-28]. Dostupné z: <https://www.wagner-maschinen.de/cs/wagner/soustruzeni>
- [39] SHABGARD, Mohammad Reza, Atanas IVANOV a Andrew REES. Influence of EDM machining on surface integrity of WC-Co. *4M 2006 - Second International Conference on Multi-Material Micro Manufacture* [online]. 2006, 331-334 [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/B978-008045263-0/50075-1>.
- [40] *Nejdůležitější oblast nástroje - ostří* [online]. 2014 [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nejdulezitejsi-oblast-nastroje-ostri>
- [41] ASTAKHOV, Viktor P. Surface Integrity – Definition and Importance in Functional Performance. In: *Surface Integrity in Machining* [online]. 2010 [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-84882-874-2_1#citeas
- [42] GORDEYKO, D. *Integrta povrchu*. Praha, 2015, 49 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Rázek Vítězslav CSc.
- [43] M & B CALIBR, SPOL. S R.O. *Měření drsnosti* [online]. [cit. 2024-02-22]. Dostupné z: <https://www.mbcaltibr.cz/mereni-drsnosti.html>
- [44] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. *ČSN EN ISO 21920-2 (014450) Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Profil - Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu*. 06/2023.
- [45] GADELMAWLA, E.S., M.M. KOURA, T.M.A. MAKSOUD, I.M. ELEWA a H.H. SOLIMAN. Roughness parameters. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2002, 123(1), 133-145 [cit. 2024-02-16]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00060-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00060-2)
- [46] MAHR. *MarSurf. Parametry drsnosti povrchu* [online]. [cit. 2024-02-23]. Dostupné z: <https://www.klz.inshop.cz/inshop/files/6910230/Parametry%20drsnosti%20Mahr-NEW.pdf>
- [47] DOLEŽAL, Pavel a Bohumil PACAL. *Hodnocení mikrotvrdosti struktur materiálů* [online]. VUT Brno, 2007 [cit. 2024-02-24].
- [48] DUŠEK, Jiří. *Tvrdost, mikrotvrdost, nanotvrdost - čisté kovy měřené metodou DSI*. Brno, 2008. Dizertační práce. Masarykova univerzita v Brně.
- [49] SOBOTOVÁ, Jana a kolektiv. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.

- [50] SHIHAB, S.K., Z.A. KHAN a A. MOHAMMAD. Optimization of surface integrity in dry hard turning using RSM. *Sadhana* [online]. 2014, 39, 1035-1053 [cit. 2024-02-22]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s12046-014-0263-4>
- [51] CHAVAN, Ajay a Vikas SARGADE. Surface Integrity of AISI 52100 Steel during Hard Turning in Different Near-Dry Environments. *Advances in Materials Science and Engineering* [online]. 2020, 2020, 13 [cit. 2024-02-24]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1155/2020/4256308>
- [52] *Přehled vlastností oceli C45 - Bolzano* [online]. [cit. 2024-04-30]. Dostupné z: https://bbolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10083/MOP_vlastnosti_C45.pdf
- [53] *Kennametal Turning Catalog 8010* [online]. [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://productivity.com/wp-content/uploads/pdfs/Kennametal%20Turning%20Catalog%208010.pdf>
- [54] FALTI. *STŘEDICÍ VRTÁK DO KOVU HSS, DIN333, TVAR A* [online]. [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.falti.cz/stredici-vrtak-do-kovu-hss-din333-tvar-a>
- [55] CZ NÁSTROJE. *Rychloupínací sklíčidlo 1-16mm MK s hákovým klíčem* [online]. [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: https://www.cznastroje.cz/Rychloupinaci-sklicidlo-1-16mm-MK-s-hakovym-klicem-d324.htm?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwi_exBhA8EiwA_kU1Mm3IY5WWCDtlgQc_XOJ4Ewx__LUuwWFriBaPLYeN5hU0JYwnuG48hhoCG84QAvD_BwE
- [56] CNCBUL.COM. *OKUMA GENOS L200E-M* [online]. [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: <https://www.cncbul.com/urun/okuma-genos-l200e-m-year-2016/>
- [57] HOFFMANN GROUP. *Garant - CNMA 120404 F* [online]. [cit. 2024-05-11]. Dostupné z: <https://www.hoffmann-group.com/CZ/cs/hot/obrabeni/soustruzeni/soustruznicke-nastroje-podelne-kobrabeni-ploch/vymenitelne-britove-desticky-pro-soustruznicke-nastroje-podelne-kobrabeni-ploch/cnma-120404-cbn720/p/255504-F?tId=366>
- [58] MAHR. *MarSurf PS 10* [online]. [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: <https://metrology.mahr.com/cs/produkty/article/6910230-mobiles-rauheitsmessgeraet-marsurf-ps-10/>

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Rozdělení skupiny ISO H materiálů podle katalogu nástrojů Dormer Pramet [16].....	21
Tabulka 2 – Limitní tvrdost součástí pro řezné materiály [21].....	22
Tabulka 3 - Chemické složení oceli C45E (12 050) v hm. % [52].....	37
Tabulka 4 – Parametry VBD – CNMG 120404MN [53].....	40
Tabulka 5 – Podmínky kalení.....	43
Tabulka 6 - Vybraná technická data soustruhu Okuma Genos L200E-M [56].....	45
Tabulka 7 - Parametry držáku nástroje - PCLNR 2020 K 12 [16].....	46
Tabulka 8 - Parametry VBD - CNMA 120404 F [57].....	47
Tabulka 9- Doporučené řezné podmínky VBD - CNMA 120404 F [57].....	47
Tabulka 10 - Rozdělení segmentů na součásti č. 1.....	48
Tabulka 11 - Vybrané technické parametry drsnoměru MarSurf PS 10 [58].....	50
Tabulka 12 - Závislost drsnosti povrchu na řezné rychlosti.....	54
Tabulka 13 - Naměřená mikrotvrdost na segmentu ①.....	56
Tabulka 14 - Průměrné mikrotvrdosti na segmentu ①.....	56
Tabulka 15 - Naměřená mikrotvrdost na segmentu ⑤.....	57
Tabulka 16 - Průměrné mikrotvrdosti na segmentu ⑤.....	57
Tabulka 17 - Řezné podmínky pro měření řezných sil.....	63
Tabulka 18 - Naměřené složky sil v závislosti na řezné rychlosti.....	64
Tabulka 19 - Směrodatné odchylky složek řezné síly.....	66
Tabulka 20 – Naměřené průměry velikostí složek řezné síly.....	66

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Běžné operace soustružení [2].....	13
Obrázek 2 - Řezné síly [2].....	14
Obrázek 3 – Vliv řezných podmínek na velikost řezných sil [3].....	16
Obrázek 4 – Základní geometrie soustružnického nože [6].....	17
Obrázek 5 - Značení nožů s VBD dle ISO [9].....	18
Obrázek 6 - Značení VBD - kód ISO [10].....	18
Obrázek 7 - Teplotní analýza soustruhu [37].....	28
Obrázek 8 - Fazetka typu S [28].....	30
Obrázek 9 - Fazetka typu T [28].....	30
Obrázek 10 - Kritérium výměny VBD [28].....	31
Obrázek 11 – Profil povrchu [43].....	33
Obrázek 12 - Drsnost povrchu R_a a R_q [46].....	34
Obrázek 13 - Drsnost povrchu R_z a R_{max} [46].....	34
Obrázek 14 - Vickersova zkouška tvrdosti [48].....	35
Obrázek 15 – Křivka prokalitelnosti oceli C45E (12 050) [52].....	38

Obrázek 16 - Popouštěcí křivka oceli C45E (12 050) [52].....	38
Obrázek 17 - Konvenční soustruh TOS SV 18 R.....	39
Obrázek 18 - Středící vrták [54].....	40
Obrázek 19 - Rychloupínací samosvorné sklíčidlo [55].....	40
Obrázek 20 - Obrábění součásti č. 1 v měkkém stavu.....	41
Obrázek 21 - Obrábění součásti č. 2 v měkkém stavu.....	41
Obrázek 22 - Obrobené součásti v měkkém stavu.....	42
Obrázek 23 - Aplikace ochranného nátěru CONDURSAL Z1100.....	43
Obrázek 24 - Komorová pec Nabertherm.....	44
Obrázek 25 - Nastavení teploty v peci.....	44
Obrázek 26 - Zakalená součást č. 1.....	44
Obrázek 27 - Soustruh Okuma Genos L200E-M.....	46
Obrázek 28 - Schéma upnutí součásti č. 1.....	48
Obrázek 29 - Upnutí součásti č. 1 v soustruhu.....	48
Obrázek 30 - NC program v Autodesk Fusion.....	49
Obrázek 31 - Obrobená součást č. 1 v zakaleném stavu.....	49
Obrázek 32 - Drsnoměr MarSurf PS 10 [58].....	50
Obrázek 33 - Struers Citopress-10.....	51
Obrázek 34 - Struers Tegamin-25.....	51
Obrázek 35 - Metalografické výbrusy.....	52
Obrázek 36 - Mikrotvrdoměr FM-100.....	52
Obrázek 37 - Vnikací těleso mikrotvrdoměru FM-100.....	52
Obrázek 38 - Matice měřených pozic.....	53
Obrázek 39 - Segment ① - Vtisky po měření mikrotvrdosti + struktura povrchové vrstvy.....	59
Obrázek 40 - Segment ① - Zvětšený detail povrchu.....	59
Obrázek 41 - Segment ① - Povrch neobrobeného čela.....	60
Obrázek 42 - Segment ① - Otřep na neobrobeném čele.....	60
Obrázek 43 - Segment ⑤ - Zvětšený detail povrchu.....	60
Obrázek 44 - Konvenční soustruh TOS SU 50/1500 s dynamometrem.....	62
Obrázek 45 - Schéma měření řezných sil.....	63
Obrázek 46 - Souřadný systém působících složek sil.....	63
Obrázek 47 - Vyhodnocení měření sil: A = vyhodnocená ustálená oblast; B = průměrné hodnoty.....	64

Seznam grafů


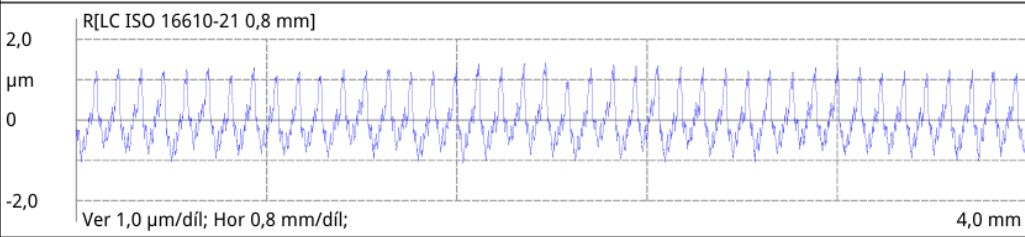
Graf 1 - Závislost parametru drsnosti povrchu Ra na řezné rychlosti.....	54
Graf 2 - Závislosti parametrů drsnosti povrchu Rz, Rmax, Rv na řezné rychlosti.....	55
Graf 3 - Závislost naměřené tvrdosti HV 0,1 na hloubce měření.....	58
Graf 4 - Závislost složek řezné síly na řezné rychlosti při $a_p = 0,1$ mm; $f = 0,1$ mm/ot.....	65

Seznam příloh


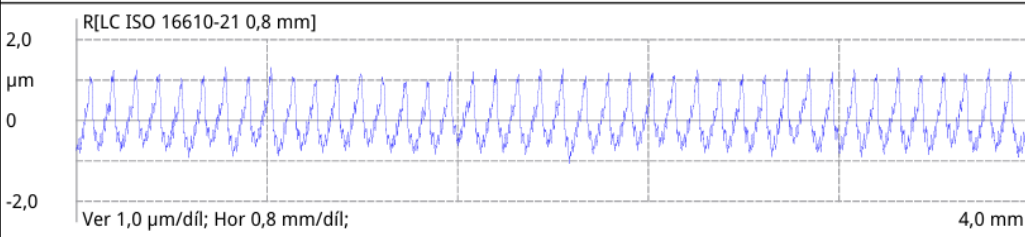
Příloha 1 – Materiálový list oceli C45E [52]

Přehled vlastností oceli C45E (C45 R)										1.1191 (1.1201)							
Druh oceli	Nelegovaná ušlechtlá ocel k zušlechťování																
TDP	ČSN EN 10083-2: 2007. Tato norma obsahuje též ocel C45, klasifikovanou jako jakostní ocel k zušlechťování. Oceli C45 nelze nahradit ušlechtlé oceli C45E popř. C45R. C45 však lze nahradit ocelmi C45E resp. C45R.																
Dřívější označení	C45E (C45R) podle ČSN EN 10083-1: 1991+A1: 1996; Ck 45 (Cm 45) podle DIN 17200; 12 050 podle ČSN.																
Použití	Často používaná nelegovaná ocel pro výrobu méně namáhaných strojních dílů ve stavu zušlechťeném nebo normalizačně žíhaném. Optimálních mechanických hodnot včetně houževnatosti se dosahuje v zakaleném a následně popuštěném stavu. U tvarově složitějších dílů se pro zamezení vzniku trhlin dává přednost kalení do oleje. Ocel je vhodná i k povrchovému kalení plamenem nebo indukci.																
Chemické složení v % hmot. (rozbor tavby)	C	Si max.	Mn	P max.	S max. ¹⁾	Cr max.	Mo max.	Ni max.	Cr+Mo+Ni								
	0,42-0,50	0,40	0,50-0,80	0,030	0,035	0,40	0,10	0,40	max. 0,63								
Složení hotového výrobku ²⁾	0,40-0,52	0,43	0,46-0,84	0,035	0,040	0,45	0,13	0,45									
Mechanické vlastnosti v zušlechťeném stavu. ³⁾	Průměr mm	R _e min. MPa		R _m MPa		A min. %		Z min. %		KV min. J							
	d ≤ 16	490		700-850		14		35		-							
	16 < d ≤ 40	430		650-800		16		40		25							
Mechanické vlastnosti ve stavu normalizačně žíhaném ³⁾	d ≤ 16	340		min. 620		14		-		-							
	16 < d ≤ 100	305		580		16		-		-							
	100 < d ≤ 250	275		560		16		-		-							
Maximální hodnoty tvrdosti pro stav :	Zpracováno na stříhatelnost (+S)				Žíháno na měkko (+A)				Povrchově kaleno (tvrdost povrchu)								
	HB max. 255				HB max. 207				HRC min. 55								
Prokalitelnost ⁴⁾	Vzdálenost od plochy kaleného čela zkušebního tělesa v mm																
	Tvrdost v HRC																
		Mez	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	15	20	25
+H	max	62	61	61	60	57	51	44	37	34	33	32	31	30	-	-	-
	min	55	51	37	30	28	27	26	25	24	23	22	21	20	-	-	-
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Popouštěcí křivka (referenční vzorek průměr 10 mm)</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Křivky prokalitelnosti</p> </div> </div>																	
Technologické vlastnosti																	
Tváření za tepla	Doporučené rozmezí teplot pro tváření za tepla : 1150 až 850 °C																
Tepelné zpracování	Normalizační Žíhání °C	Žíhání na měkko °C	Isotermické Žíhání °C	Teplota Kalení °C	Kalící prostředí	Teplota popouštění °C	Zkouška kalením čela °C										
	840 až 880	650 až 700	800 až 950 660 -1 hod.	820 až 860	voda nebo olej	550 až 660	850 ± 5										
	Uvedené podmínky jsou doporučené s výjimkou zkoušky kalením čela (zkouška prokalitelnosti.) Teplota kalení při spodní hranici se doporučuje pro kalení do vody a při horní hranici při kalení do oleje. Jako kalící prostředí lze použít i syntetické kapaliny-emulze.																
Obrobitelnost	Obrobitelnost třískovým obráběním může být ve stavu po válcování ztížena vlivem zvýšené pevnosti. Pro obrábění je výhodnější stav žíhaný na měkko. Zlepšenou obrobitelnost vykazuje ocel C45R se zvýšeným obsahem S.																
Stříhatelnost	Přichází v úvahu např. při dělení tyčí na vsázkové délky pro zápusťkové kování. Ocel C45 je stříhatelná za studena i ve stavu po válcování u průměru nad 80 mm.																
¹⁾ obsah síry u oceli C45R je 0,020 až 0,040 % s dovolenou odchylkou v hotovém výrobku ± 0,005 %. ²⁾ u jedné tavby smí být překročena horní nebo spodní hranice rozmezí, ale nikoliv obě současně. ³⁾ uvedené hodnoty musí být dosažitelné po odpovídajícím tepelném zpracování (zušlechťení popř. normalizačním žíhání) též u oceli dodávané ve stavu po válcování nebo ve stavu měkce žíhaném. Prokazují se na referenčním vzorku odpovídajícího průměru. Zkušební tělesa pro stanovení mechanických hodnot musí být odebrána v souladu s předpisem normy TDP. R _e – mez kluzu, R _m – pevnost v tahu, A – tažnost (počáteční délka L ₀ = 5,65√S ₀), Z – kontrakce, KV – nárazová práce, zkušební těleso ISO s V-vrubem (průměr ze tří naměřených hodnot, z nichž žádná nesmí být menší než 70% minimální střední hodnoty). ⁴⁾ pro ocel objednanou bez požadavků na prokalitelnost jsou hodnoty prokalitelnosti pouze informativní.																	


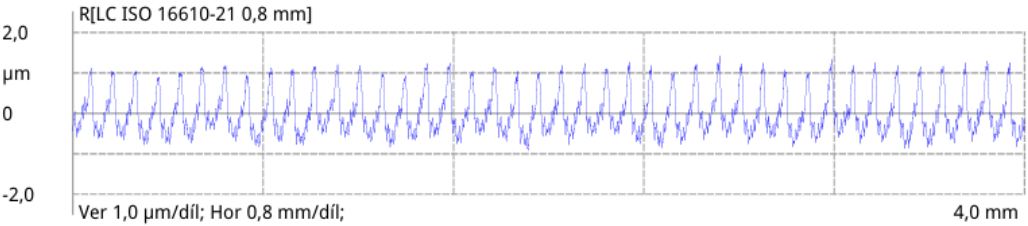
Příloha 2 – Protokol z měření drsnosti segmentu ①

		MarSurf PS 10 1.00-28	
		<2.text>	
			
R[LC ISO 16610-21 0,8 mm]			
Ra		0,459 µm	
Rz		2,389 µm	
Rmax		2,488 µm	
Rv		1,049 µm	


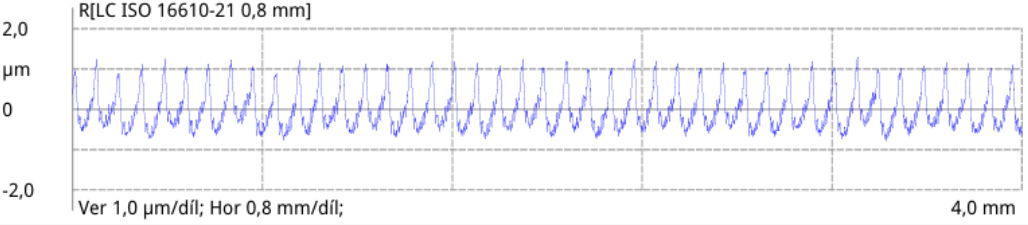
Příloha 3 – Protokol z měření drsnosti segmentu ②

		MarSurf PS 10 1.00-28	
		<2.text>	
			
R[LC ISO 16610-21 0,8 mm]			
Ra		0,459 µm	
Rz		2,253 µm	
Rmax		2,353 µm	
Rv		0,937 µm	

Příloha 4 – Protokol z měření drsnosti segmentu ③

		MarSurf PS 10 1.00-28	
Datum vytvoření:	04.05.2024 17:49	Lt:	4,8 mm
Přístroj:	MarSurf PS 10 (5321)	Ls:	2,5 µm
Snímač:	PHT 350	VB:	+/- 200,0 µm
		Vt:	1,0 mm/s
		Body:	9600
		<2.text>	
			
R[LC ISO 16610-21 0,8 mm]			
Ra	0,425 µm		
Rz	2,135 µm		
Rmax	2,264 µm		
Rv	0,857 µm		

Příloha 5 – Protokol z měření drsnosti segmentu ④

		MarSurf PS 10 1.00-28	
Datum vytvoření:	04.05.2024 17:50	Lt:	4,8 mm
Přístroj:	MarSurf PS 10 (5321)	Ls:	2,5 µm
Snímač:	PHT 350	VB:	+/- 200,0 µm
		Vt:	1,0 mm/s
		Body:	9600
		<2.text>	
			
R[LC ISO 16610-21 0,8 mm]			
Ra	0,398 µm		
Rz	1,996 µm		
Rmax	2,081 µm		
Rv	0,741 µm		

Příloha 6 – Protokol z měření drsnosti segmentu ⑤

Mahr		MarSurf PS 10 1.00-28	
Datum vytvoření:	04.05.2024 17:54	Lt:	4,8 mm
Přístroj:	MarSurf PS 10 (5321)	Ls:	2,5 μm
Snímač:	PHT 350	VB:	+/- 200,0 μm
		Vt:	1,0 mm/s
		Body:	9600
		<2.text>	
R[LC ISO 16610-21 0,8 mm]			
Ra	0,387 μm		
Rz	2,072 μm		
Rmax	2,142 μm		
Rv	0,854 μm		