

ZAPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303T004 Strojírenská technologie – technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv obráběného materiálu při frézování ozubení na proces
obrábění

Autor: **Bc. Nikola KLIČKOVÁ**

Vedoucí práce: **Ing. Miroslav ZETEK, Ph.D.**

Akademický rok 2012/2013

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:.....

.....

podpis autora

Autorská práva

Podle Zákona o právu autorském. č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákon o vysokých školách č. 111/1998 Sb. Je využití a společenské uplatnění výsledků diplomové práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Poděkování

Ráda bych poděkovala všem pedagogickým pracovníkům Západočeské univerzity v Plzni a všem pracovníkům firmy Wikov Gear s.r.o., kteří mě během studia a vypracovávání diplomové práce vedli a předávali mi své znalosti a zkušenosti.

Poděkování patří především vedoucímu diplomové práce:

Ing. Miroslavu Zetkovi, PhD., ZČU Plzeň, FST – KTO

Konzultantovi diplomové práce:

Ing., Lukášovi Skopečkovi, Wikov Gear s.r.o.

Dále bych ráda poděkovala Ing. Ivaně Česákové a Ing. Davidovi Aišmanovi za cenné rady a připomínky a celé své rodině za poskytnuté zázemí a podporu při studiu.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Kličková	Jméno Nikola		
STUDIJNÍ OBOR	2303T004 Strojírenská technologie – technologie obrábění			
VEDOUČÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zetek, Ph.D.	Jméno Miroslav		
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Vliv obráběného materiálu při frézování ozubení na proces obrábění			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2013
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	85	TEXTOVÁ ČÁST	80	GRAFICKÁ ČÁST	5
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Tato práce se zabývá obrobiteľnosťí oceli 18CrNiMo 7-6. Teoretická část této práce se zabývá obecným popisem, ovlivňujícími vlastnostmi a vyhodnocováním obrobiteľnosti. V experimentální části je porovnáván stejný materiál, s rozdílem, že k překování materiálu na požadovaný tvar probíhalo ve třech různých kovárnách. V práci se vyhodnocovalo opotřebenění břitů nástroje, vzniklé třísky, řezné síly, struktura a mikrotvrdost. Velkým přínosem je spolupráce s firmou Wikov Gear s. r. o., obohacení teoretických znalostí a experimentálních zkušeností, které se týkají problematiky obrobiteľnosti.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p style="text-align: center;">Obrobiteľnosť, ocel 18CrNiMo7-6, opotřebenění břitů, řezné síly</p>

SUMMARY OF DIPLOMA WORK

AUTHOR	Surname Kličková	Name Nikola	
FIELD OF STUDY	2303T004 - Manufacturing Processes - Technology of Metal Cutting		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zetek Ph.D.	Name Miroslav	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	The influence of workpiece during milling gear on machining process		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machine Technology	SUBMITTED IN	2013
----------------	------------------------	-------------------	--------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	85	TEXT PART	80	GRAPHICAL PART	5
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>This case study discusses 18CrNiMo 7-6 steel machinability. Theoretical part of this work talks about general descriptions, influencing characteristics and machineability assesment. In the experimental part of the study same material is being compared to others with distinction that reforging of the material to the required shape was done in three different forging workshops. Tool wear, chip production, cutting forces, structure and microhardness was all being evaluated in this case study. The biggest contribution was the cooperation with Wikov Gear s.r.o., increasing theoretical knowledge and practical experiences related to steel machinability.</p>
KEY WORDS	Machinability, steel 18CrNiMo7-6, tool wear, cutting forces

Obsah

Seznam příloh	8
Seznam použitých veličin a symbolů	9
1 Úvod	13
1.1 Obrobitelnost	13
1.2 Ovlivňující vlastnosti obrobitelnosti	15
1.2.1 Fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného materiálu	15
1.2.2 Způsob výroby a tepelné zpracování obráběného materiálu	18
1.2.3 Mikrostruktura obráběného materiálu	19
1.2.4 Legující prvky	19
1.3 Vyhodnocování obrobitelnosti	21
1.3.1 Dlouhodobé zkoušky obrobitelnosti	22
1.3.2 Krátkodobé zkoušky obrobitelnosti	23
2 Analýza současného stavu	32
2.1 Obráběné materiály	32
2.1.1 Ocel	32
2.1.2 Litiny	34
2.1.3 Hliník	35
2.1.4 Měď	36
2.1.5 Níkl	36
2.2 Obrábění tvrdých materiálů	37
2.2.1 Slinuté karbidy	39
2.2.2 Cermety	42
2.2.3 Keramika	43
2.2.4 Kubický nitrid boru	45

2.2.5	Polykrystalický diamant	46
3	Definování klíčových příčin omezení při obrábění	47
4	Návrh, realizace a vyhodnocení experimentu.....	51
4.1	Úvod k experimentálnímu studiu	51
4.2	Technická charakteristika experimentálního zařízení	53
4.2.1	Obráběcí stroj	53
4.2.2	Nástroj	53
4.2.3	Obrobek	54
4.3	Vstupní experimenty.....	54
4.3.1	Stanovení řezných podmínek dle krátkodobé zkoušky	54
4.3.2	Stanovení řezných podmínek dle dlouhodobé zkoušky	57
4.4	Realizace experimentu.....	58
4.4.1	Experiment - Kovárna I.....	58
4.4.2	Experiment - Kovárna II	60
4.4.3	Experiment - Kovárna III	62
4.5	Sumarizace výsledků	64
4.5.1	Vyhodnocení opotřebení břitu nástroje	64
4.5.2	Vyhodnocení vzniklých třísek.....	65
4.5.3	Vyhodnocení řezných sil	66
5	Technicko-ekonomické zhodnocení.....	82
6	Závěr	85
	Použitá literatura.....	86

Seznam příloh

PŘÍLOHA P1....Charakteristika materiálu 18CrNiMo 7-6

PŘÍLOHA P2.... Parametry obráběcího centra MCV 75 A

PŘÍLOHA P3.... Charakteristika obrobku

PŘÍLOHA P4.... Zařízení pro měření řezných sil

PŘÍLOHA P5... Optický mikroskop MULTICHECK PC500

Seznam použitých veličin a symbolů

ZČU		Západočeská univerzita
KTO		Katedra technologie obrábění
T	[min]	Trvanlivost
v_T	[m/min]	Řezná rychlost při stanovené trvanlivosti
i		Index obrobitelnosti
A		Pevnost v tahu
B		Tvrдость
C		Pevnost v ohybu
D		Tažnost
TC		Tepelná vodivost
M		Obrobitelnost
v_c	[m/min]	Řezná rychlost
FeO		Oxid železnatý
MnO		Oxid manganatý
TiC		Karbid titanu
Al ₂ O ₃		Oxid hlinitý
Mn		Mangan
Ni		Nikl
Pb		Olovo
Co		Kobalt
S		Síra
Cr		Chrom

P		Fosfor
V		Vanad
C		Uhlík
Mo		Molybden
Nb		Niob
W		Wolfram
B		Bor
Al		Hliník
Be		Berilium
T_n	[min]	Trvanlivost
VB_{opt}	[μm]	Optimální velikost opotřebení na hřbetě nástroje
VB_B	[μm]	Velikost opotřebení na hřbetě nástroje
K_v		Index obrobiteľnosti
D_o	[mm]	Vnitřní průměr
D	[mm]	Vnější průměr
V_{Czk}	[$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	Řezná rychlost zkoumaného materiálu
V_{Cet}	[$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	Řezná rychlost etalonového materiálu
d_e	[mm]	Průměr vtisku do etalonového materiálu
d_{zk}	[mm]	Průměr vtisku do zkoumaného materiálu
$(v_{cmax} - v_{cmin})_e$	[$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	Rozdíl řezných rychlostí etalonového materiálu
$(v_{cmax} - v_{cmin})_{zk}$	[$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	Rozdíl řezných rychlostí zkoušeného materiálu
r_{te}	[mm]	Poloměr svinované třísky etalonového materiálu
r_{tzk}	[mm]	Poloměr svinované třísky zkoumaného materiálu

K_{zk}		Koeficient přechování třísky testovaného materiálu
K_e		Koeficient přechování třísky referenčního materiálu
a_{pzk}	[mm]	Hloubka vniknutí nože do zkoumaného materiálu
a_{pe}	[mm]	Hloubka vniknutí nože do referenčního materiálu
h_{zk}	[mm]	Vyvrtaná hloubka otvoru do zkoušeného materiálu
h_e	[mm]	Vyvrtaná hloubka otvoru do referenčního materiálu
Θ_e	[°C]	Střední teplota řezání etalonového materiálu
Θ_{zk}	[°C]	Střední teplota řezání zkoumaného materiálu
HM_e	[μm]	Hloubka zpevněné vrstvy etalonového materiálu
HM_{zk}	[μm]	Hloubka zpevněné vrstvy testovaného materiálu
R_a	[μm]	Střední aritmetická úchylka profilu
HSTR		Žáropevné slitiny
HRC		Tvrdost ve stupních Rockwella
PD		Polykrystalický diamant
PKNB		Polykrystalický nitrid boru
Si_3N_4		Nitrid křemičitý
SK		Slinutý karbid
RO		Rychlořezná ocel
HSS		High speed steel
ISO		Mezinárodní organizace pro normalizaci (International Organization for Standardization)
WC		Karbid wolframu
TiN		Nitrid titanu
TiAlN		Otěrurvzdorný povlak nástroje

TiCN		Otěruvzdorný povlak nástroje
Mo ₂ C		Karbid molibdatý
ZrO ₂		Oxid zirkoničitý
CoO		Oxid kobaltnatý
HV		Tvrдость ve stupních Vickerse
SiC		Karbid křemíku
HB		Tvrдость ve stupních Brinella
D	[mm]	Průměr frézy
d	[mm]	Průměr upínacího prvku
l	[mm]	Délka řezné části
L	[mm]	Délka frézy
Z	[1]	Počet zubů
f _z	[mm]	Posuv na zub
a _e	[mm]	Šířka řezu
a _p	[mm]	Hloubka řezu
ΔT	[min]	Přírůstek času řezání
ΔVB _B	[μm]	Přírůstek opotřebení
I	[μm/min]	Intenzita opotřebení
n	[ot/min]	Otáčky
F _x	[N]	Řezná síla ve směru x
F _z	[N]	Řezná síla ve směru z

1 Úvod

Neustálý rostoucí tlak trhu na stále pevnější materiály hlavně z důvodů potřeby delší životnosti a lepších mechanických vlastností, souvisí i s vyššími nároky na řezné materiály, které budou schopny tyto nové materiály obrábět. Další vlastnosti, na které je také kladen stále větší důraz, je vyšší užitná hodnota, jakost a spolehlivost výrobku, vyšší výkon, snižování hmotnosti a energetické náročnosti. Souhrn všech těchto vlastností, které proces obrábění charakterizují z pohledu obrobku, se nazývá obrobiteľnosť.

1.1 Obrobiteľnosť

Obrobiteľnosť materiálu je souhrn vlastností obráběného materiálu z hlediska jeho vhodnosti pro výrobu součástí určitým způsobem obrábění. Znamená to, jak snadné nebo naopak obtížné je opracovávat obrobek řeznými nástroji. [1] Přesto, že je obrobiteľnosť ovlivněna více faktory (materiál obrobku, řezné nástroje a řezné podmínky, strojní vybavení, strategie řezného procesu, upnutí obrobků a nástrojů, způsob chlazení, odborné znalosti technologů atd.) jedná se o vlastnost materiálu. [2] Obrobiteľnosť není jednoznačně definována a to z různorodosti operací obrábění, vývoje a zlepšování řezných nástrojů. [1]

Rozlišujeme kinetickou obrobiteľnosť, která je stanovena na základě otupení řezného břítu, dále dynamickou obrobiteľnosť, kdy řezná síla, krouticí moment nebo výkon potřebný k úběru obráběného materiálu a řezné teplo jsou mírou dynamické obrobiteľnosti, mikrogeometrickou obrobiteľnosť, která je dána jakostí obrobeného povrchu a přesností lineárních rozměrů a nakonec komplexní obrobiteľnosť, která je určena více faktory. [3]

Kriteria obrobiteľnosti:

1. kriterium (nejčastější): Intenzita otupování, trvanlivost břítu, řezná rychlost při stanovené T $\Rightarrow v_T$. Jedná se o tzv. kinetickou obrobiteľnosť. [4]

Technické konstrukční materiály, pro potřeby vyhodnocování obrobiteľnosti, jsou rozděleny do osmy základních skupin, které se označují malými písmeny [5]:

a - litiny	b - oceli	c - těžké neželezné kovy	d – lehké neželezné kovy
e – plastické hmoty	f – přírodní nerostné hmoty	g – vrstvené hmoty	v – tvrzené litiny pro výrobu válců

Pro každou skupinu je určen etalonový materiál, který se porovnává s daným vzorkem. Ve skupinách je maximálně 20 tříd obrobitelnosti. Do třídy obrobitelnosti se vzorek zařazuje dle indexu obrobitelnosti i :

$$i = \frac{V_T \text{ vzorku}}{V_T \text{ etalonu}}$$

V každé třídě je určité rozpětí i (mezi i_{\min} a i_{\max}). Pokud $i < 1$ znamená to horší obrobitelnost materiálu než etalon, pokud $i > 1$ materiál má lepší obrobitelnost než etalon.

2. kritérium: Velikost energie (řezných sil) potřebné na řezný proces - tzv. dynamická obrobitelnost

3. kritérium: Integrita obrobeného povrchu (rozměry, drsnost zbytková pnutí, atd.) - tzv. mikrogeometrická obrobitelnost

4. kritérium: Teplota řezání

5. kritérium: Druh a tvar třísky [4]

Obrobitelnost lze označit jako funkční veličinou vztahu nástroj / obrobek, pro kterou jsou důležitá tyto činitele:

- utváření třísky;
- stav povrchové vrstvy;
- výkon obrábění;
- řezná síla / příkon;
- sklon k vytváření nárůstku;
- trvanlivost bříty.

Dále je hlavním faktorem pro volbu řezných podmínek a pro funkci nástroje při všech metodách obrábění.

Před začátkem procesu obrábění je vhodné posoudit a ověřit obrobitelnost materiálu z důvodu optimalizace podmínek obrábění. Je nutné se zaměřit na důležité a podstatné vlastnosti a také na to, jak tyto vlastnosti na obrobitelnost působí. [1]

1.2 Ovlivňující vlastnosti obrobitelnosti

Obrobitelnost je komplexní vlastnost, která je dána fyzikálními vlastnostmi, chemickým složením, mikrostrukturou a dalšími charakteristikami obráběného materiálu. Dále se mění také ve vztahu k řeznému materiálu, řeznému prostředí, způsobu obrábění, geometrii břitu a dalším charakteristikám řezného procesu. Nejdůležitější ovlivňující vlastnosti jsou především fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného materiálu, způsob výroby a tepelné zpracování obráběného materiálu, mikrostruktura obráběného materiálu, legující prvky, metoda obrábění, pracovní prostředí, geometrie nástroje, druh a vlastnosti řezného materiálu. [4] [6]

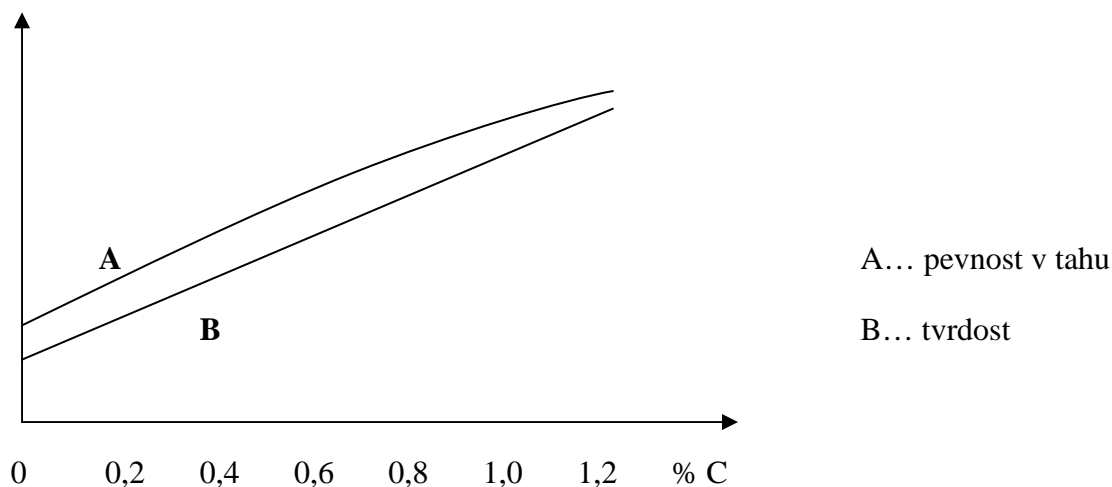
1.2.1 Fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného materiálu

Tvrdość a pevnost

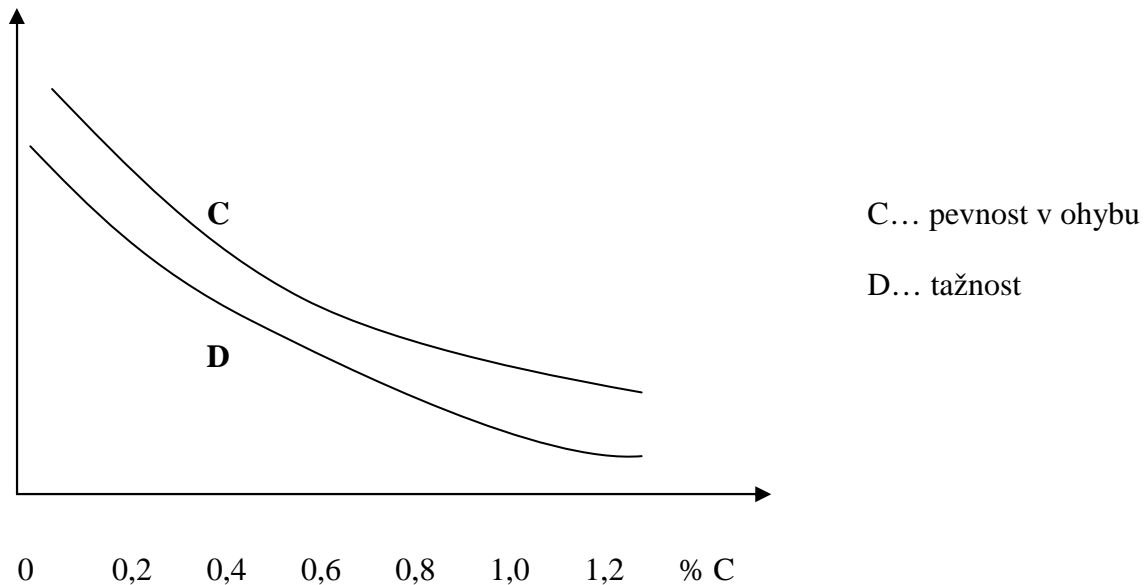
Nízké hodnoty tvrdosti a pevnosti jsou výhodné, avšak materiály, které způsobují dlouhou třísku, tvoří výjimku. Vlivem vytváření nárůstku se zhoršuje kvalita obrobené plochy, vznikají otřepy a zkracuje se trvanlivost břitu. Vyšší tvrdost má tedy pozitivní účinek.

Tvárnost

Nízké hodnoty tažnosti mají pozitivní vliv. Umožňují vhodné utváření třísky a lepší využití výkonu motoru obráběcího stroje. Čím větší tvrdost, tím menší tažnost a naopak. Příznivá obrobitelnost musí být tedy vhodným kompromisem mezi tvrdostí a tažností. Následující grafy (Obr. 1-1, Obr. 1-2) ukazují, jak se mění pevnost v tahu a ohybu, tvrdost a tažnost se vzrůstajícím podílem uhlíku. [1]



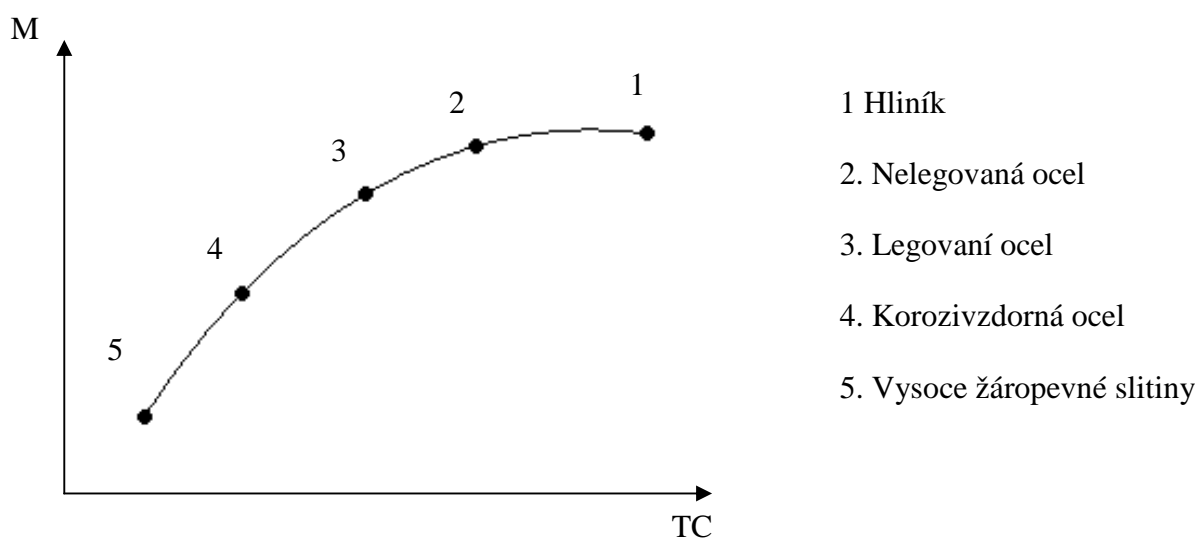
Obr. 1-1 Změna pevnosti v tahu a tvrdosti se vzrůstajícím podílem uhlíku [1]



Obr. 1-2 Změna pevnosti v ohybu a tažnosti se vzrůstajícím podílem uhlíku [1]

Tepelná vodivost

Vysoká tepelná vodivost způsobuje, že teplo, které vznikne při obrábění, je rychle odváděno z místa řezu. Z hlediska obrábění je tedy vysoká hodnota považována za výhodnou. Ve vztahu k obrobiteľnosti může tepelná vodivost hrát důležitou roli, avšak u určité skupiny slitin je tato vlastnost málo účinná. Diagram (Obr. 1-3) znázorňuje přibližné vyhodnocení obrobiteľnosti (M) v závislosti na tepelné vodivosti (TC). [1]



Obr. 1-3 Znáornění přibližného vyhodnocení obrobiteľnosti v závislosti na tepelné vodivosti [1]

Vměstky

Makrovměstky (nad 150 μm) jsou často velmi tvrdé a abrazivní, proto je vhodné volit materiály, kde se takovéto částice nevyskytují. Vznikají v důsledku nečistot v peci, nedostatečného odstranění strusky apod.

Mikrovměstky se vyskytují v určitém rozsahu v každé oceli. Na obrobitelnost mají různý vliv, např. oxidy hliníku (Al_2O_3) nebo karbidy titanu (TiC) jsou nežádoucí vměstky, oxidy železa a manganu (FeO, MnO) jsou méně žádoucí, ale tolerované vměstky. Mají větší schopnost tváření a lze je odstranit odcházející třískou. Žádoucími vměstky jsou silikáty, z důvodu, že při vysokých řezných teplotách měknou a vytvářejí v místě řezu vrstvu, která zpomaluje opotřebení břitu nástroje.

Přísady pro zlepšení obrobitelnosti

Pro zlepšení obrobitelnosti se do oceli přidává síra. Pokud ocel obsahuje dostatečné množství manganu, tvoří síra a mangan sulfid manganu. Během tvorby třísky se sulfidové vměstky plasticky deformují, tím se vytvoří oblast s malou pevností, ve které se snižuje energie potřebná k oddělení materiálu. Obsah síry úplně neovlivňuje obrobitelnost materiálu, záleží na velikosti, tvaru a rozvrstvení sulfidů.

Další přísada, která se používá, pro zlepšení obrobitelnosti, je olovo. Chová se podobně jako síra a používají se sloučeniny olova a síry v různých kombinacích. Také se často jako přísada používá selen ve sloučenině se sírou. [1]

Zvýšené hodnoty	Všeobecný vliv na obrobitelnost
Tvrдость a pevnost	-
Tažnost	-
Tepelná vodivost	+
Zpevnění zastudena	-

Podíl vměstků	
- makrooblast	-
- mikrooblast	-/+
Přísady pro zlepšení obrobiteľnosti	++

Tab. 1-1 Vlivy na obrobiteľnost [1]

1.2.2 Způsob výroby a tepelné zpracování obráběného materiálu

Válcování zatepla

Po válcování má obrobek většinou nehomogenní a hrubší strukturu. Je to z důvodů, že ocel během válcování je vystavena vysokým teplotám. Dochází k materiálovým odchylkám a vznikají póry, které mají negativní vliv na obrobiteľnost.

Normalizační žíhání

Během tohoto procesu je obrobek zahříván tak dlouho až dojde k úplné přeměně materiálu na austenit. Poté se hned obrobek ochladí na pokojovou teplotu. Hrubá struktura, která vznikla při válcování zatepla, se přemění na homogennější a jemnější strukturu. Z toho vyplývá výrazné zlepšení obrobiteľnosti.

Žíhání na měkko

Tímto procesem se uvádí obrobek do stavu, který jej dělá obrobiteľným. Dochází k přeměně lamely cementitu, které jsou obsažené v perlitu na globulární cementit. Výsledkem je feritická struktura, která má výrazně nižší tvrdost. Výhodou globulárního cementitu je, že nástroj řeže výrazně méně hluboko do tvrdého a abrazivního cementitu ve srovnání s ocelí v nežíhaném stavu. Nelegované oceli, které mají obsah uhlíku nižší než 0,5% se obvykle nežíhají naměkko, neboť tyto oceli v normalizačně žíhaném, válcovitém či kovaném stavu lze dobře obrábět. Naopak oceli s vysokým obsahem uhlíku musí být žíhány na měkko, aby byla dosažena dobrá obrobiteľnost.

Tažení zastudena

Před tímto procesem bývá ocel podrobena normalizačnímu žíhání nebo žíhání naměkko. Používá se pro relativně malé polotovary či obrobky, u kterých je jednoduché dosáhnout homogenní struktury. U tohoto způsobu se zvyšuje pevnost oceli. Zpevňování

zastudena lze považovat z hlediska obrobitelnosti za příznivý, neboť se jím zlepšuje kvalita povrchu, zmenšuje se tvorba nárůstku a dochází ke zredukování vzniku otřepů. [1]

1.2.3 Mikrostruktura obráběného materiálu

Obrobitelnost je ovlivňována tehdy, pokud struktura materiálu způsobuje abrazivní vlastnosti. Abrazivními částicemi oceli jsou karbidy, které rozhodují o vlastnostech materiálu podle jejich četnosti a formě v jaké se vyskytují. Struktura je ovlivňována množstvím uhlíku a ostatními legujícími prvky.

Podle procentuálního podílu uhlíku vzniká různá struktura. Nebereme – li v úvahu austenit, rozeznáváme u materiálu v nezakaleném stavu a při běžné teplotě následující struktury:

- ferit;
- perlit;
- cementit.

Cementit je tvrdý a abrazivní, zatím co ferit se vyznačuje tím, že je měkký a tažný. Cementit má nejtvrdší strukturu jakou lze dosáhnout. Perlit se skládá z tenkých plátků feritu a cementitu, které vytvářejí střídané lamely. Tvrdost perlitické struktury závisí na velikosti lamel, čím jsou lamely jemnější, tím mají větší tvrdost a naopak. Kvůli vysokému abrazivnímu účinku na opotřebení, který je vyvolaný i malým podílem cementitu v oceli, dochází ke snižování trvanlivosti břitů nástroje a tím i negativně působí na obrobitelnost. [1]

1.2.4 Legující prvky

Legující prvky výrazně ovlivňují vlastnosti materiálů. Uhlík je u ocelí rozhodujícím prvkem, který ve velké míře ovlivňuje mechanické vlastnosti a obrobitelnost. Pokud dochází ke zvyšování obsahu uhlíku v oceli, tak se kinetická obrobitelnost při obrábění slinutými karbidy, keramickými řeznými materiály a při hrubování rychlořeznými nástroji zhoršuje. Naopak je tomu u obrábění na čisto nástroji z rychlořezné oceli, kde se kinetická obrobitelnost s rostoucím obsahem uhlíku nejdříve zlepšuje, potom se zhoršuje. Mikrogeometrická obrobitelnost s přírůstkem uhlíku se výrazně zlepšuje a dynamická obrobitelnost se zhoršuje. Dále ulehčuje kalení slitin a spolu se železem, chrómem a vanadem vytváří tvrdé karbidy, které mají za následek vyšší pevnost a odolnost proti opotřebení.

Dalším legujícím prvkem, který ovlivňuje obrobitelnost, je mangan. Jeho působení závisí podstatně na obsahu uhlíku. S rostoucím obsahem manganu se kinetická i dynamická obrobitelnost zhoršuje, ale mikrogeometrická obrobitelnost se naopak zlepšuje. Velmi špatná je kinetická obrobitelnost oceli s obsahem manganu kolem 12 %.

Chrom má velmi podobný vliv jako mangan, zhoršuje obrobitelnost. Přidává se z důvodu zvýšení pevnosti, rázové houževnatosti a odolnosti proti opotřeбенí. Rovněž působí příznivě na kalení slitin.

Síra, fosfor a mangan snižují plasticitu oceli. Síra tvoří s manganem sulfid (MnS), který zlepšuje plasticitu, fosfor podporuje lámání třísky a při obsahu 0,1 % výrazně zlepšuje obrobitelnost.

Dále obrobitelnost ovlivňuje křemík, který při větším obsahu zvyšuje brusný účinek obráběné oceli, což způsobuje podstatné zkrácení trvanlivost břitu. Také se jím zhoršuje kinetická obrobitelnost. Jeho přítomnost však umožňuje kontrolovatelné utváření třísky.

Obsah olova do 0,2 % nemění prvotní mechanické vlastnosti oceli, ale velmi zlepšuje kinetickou obrobitelnost. Ulehčuje vznik krátké křehké třísky.

Další ovlivňující prvky jsou molybden a vanad. Pokud se vyskytují ve větším množství, zvyšují pevnost a houževnatost ocelí, a tím pádem zhoršují kinetickou a dynamickou obrobitelnost. Naopak mikrogeometrickou obrobitelnost zlepšují.

Hliník, při obrábění nitridovaných ocelí může stěžovat kontrolu třísky. Při vysokých teplotách spolu s dusíkem tvoří tvrdé nitridy. S toho důvodu vzniká velmi tvrdá povrchová vrstva.

Vzhledem k tomu, že berylium je jedovaté, obrábění kovu, kde je obsažen tento prvek, je velmi nebezpečné. Používá se z důvodu vytvrzení slitin mědi a ke zlepšení elasticity.

Kobalt, jako legující prvek se používá u mnoha slitin. Přidává se například do ocelí s vysokou pevností, žárovevných superslitin a materiálu, ze kterých se vyrábějí magnety, neboť kobalt zvyšuje magnetismus. Při vyšších teplotách tvoří velmi tvrdé karbidy a udržuje se tím tak tvrdost slitin.

Měď se hlavně přidává při výrobě mosazi a bronzu. Co se týká obrobitelnosti, je její vliv různorodý. Záleží na tom, jaký prvek byl použit jako druhá hlavní složka slitiny a v jakém množství se obě legující složky vyskytují.

Hořčík se používá zejména pro výrobu velmi lehkých slitin, pokud mají mít vysokou pevnost, houževnatost nebo žárovevnost a dobrou rázovou pevnost. Obrobitelnost je zde velmi dobrá, ale musí se dbát v úvahu možnost vznícení.

Titan, který se sloučí s hliníkem, manganem, cínem či vanadem tvoří slitiny s vysokou pevností, korozivzdorností a jsou velmi lehké.

Wolfram slouží obzvláště jako legující prvek pro zlepšení tvrdosti a také pro výrobu obrobků z materiálů s vysokým bodem tavení.

Často se stává, že oceli se stejným chemickým složením a strukturou mají odlišnou obrobitelnost. Důvod je takový, že v oceli se nachází různý podíl plynu a kyslíčků, popřípadě jejich nerovnoměrné rozdělení. [1]

Negativní	Mn, Ni, Co, Cr, V, C < 0,3 %, C > 0,6 %, Mo, Nb, W, B, Al, Be
Pozitivní	Pb, S, P, C 0,3 – 0,6 %

Tab. 1-2 Vlivy legujících prvků na obrobitelnost [1]

1.3 Vyhodnocování obrobitelnosti

Absolutní obrobitelnost lze charakterizovat buď funkčními vztahy a souvisejícími parametry nebo velikostí dané veličiny, která charakterizuje obrobitelnost.

Relativní obrobitelnost je charakterizována bezrozměrnými čísly vyjadřující poměr mezi veličinou vztahující se k danému materiálu obrobku a veličinou odpovídající etalonovému materiálu obrobku. [6]

Pro hodnocení obrobitelnosti je možné použít několik kvantitativních měřítek: index obrobitelnosti, životnost nástroje, kvalita povrchu při standardizovaných řezných podmínkách a další měřítka, jako jsou řezné síly a výkon, teplota, utváření třísky, aspekty životního prostředí atd. [2]

Je spousta rychlých, dostatečně přesných a objektivních možností jak stanovit obrobitelnost u nově vyvinutého řezného, vysoce houževnatého obráběného materiálu. Jedná se o tyto možnosti:

- Míra závislosti na řezné rychlosti;
- dosažená drsnost obrobené plochy;

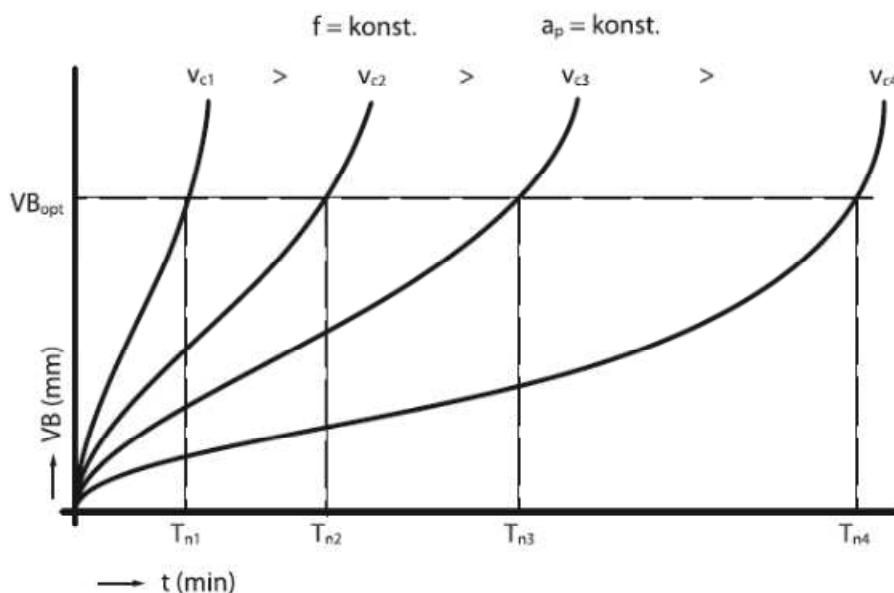
- velikost opotřebení;
- množství energie potřebné k odřezání dané vrstvy materiálu;
- vztah k dosahované teplotě řezání;
- druh a tvar tvořící se třísky. [6]

1.3.1 Dlouhodobé zkoušky obrobiteľnosti

Zkouška tohoto typu je v podstatě jen jedna. Řezná rychlost je zde hlavním kritériem a zkouška se provádí soustružením nebo frézováním při dohodnutých konstantních parametrech, určitých druzích řezného nástroje a geometrie pro několik hodnot řezných rychlostí až do doby optimálního otupení břitu. Zkouška se považuje za základní a dle ní se posuzuje rozsah objektivit ostatních zkoušek obrobiteľnosti. Je vhodná i k posuzování řezivosti nástrojů. Velkou nevýhodou této metody je velká spotřeba obráběného materiálu a časová náročnost.

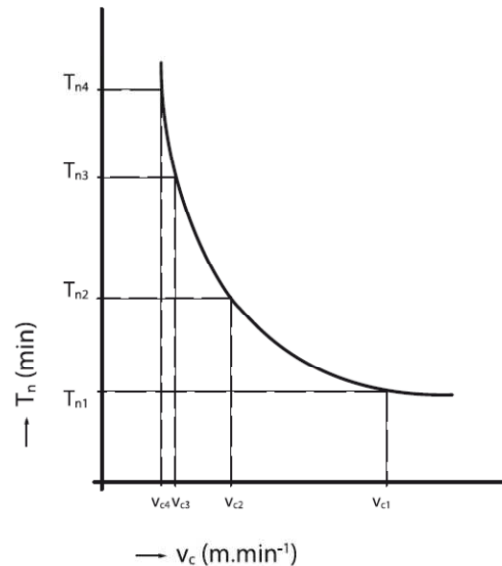
Průběh dlouhodobé zkoušky:

- Měření časového průběhu opotřebení na hřbetě nástroje VB_B pro různé hodnoty rychlostí při konstantních řezných parametrech a následné sestrojení křivky otupení;



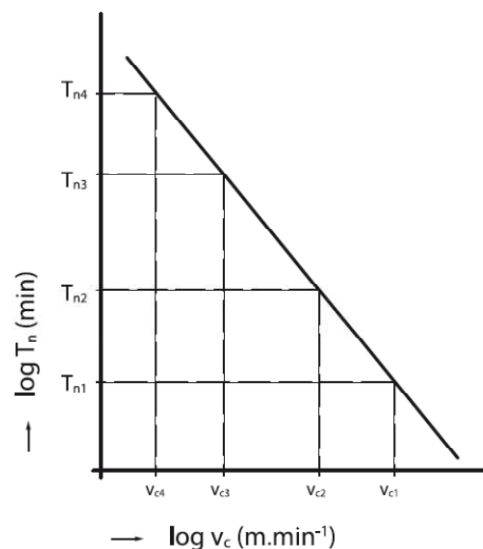
Obr. 1-4 Graf závislosti opotřebení na čase [6]

- určení kritéria opotřebení VB_{opt} a stanovení odpovídající trvanlivosti pro jednotlivé řezné rychlosti;



Obr. 1-5 Graf závislosti trvanlivosti na řezné rychlosti [6]

- sestavení závislosti $T_n = f(v_c)$ v logaritmických souřadnicích. [6]



Obr. 1-6 Graf závislosti trvanlivosti na řezné rychlosti v logaritmických souřadnicích [6]

1.3.2 Krátkodobé zkoušky obrobitelnosti

Tyto zkoušky se vyznačují nesrovnatelně krátkou dobou trvání, nižší spotřebou obrobeného materiálu, ale i menší objektivností. Jsou vhodné pro velmi rychlé rozčlenění do skupin materiálu dle stupně obrobitelnosti. Dále tyto zkoušky lze rozdělit podle principu a použitého kritéria na zkoušky přímé a nepřímé.

Přímé metody:

Metoda založená na přímém zjišťování intenzity opotřebení při upravených podmínkách. Existuje mnoho způsobů přímého zjišťování obrobiteľnosti.

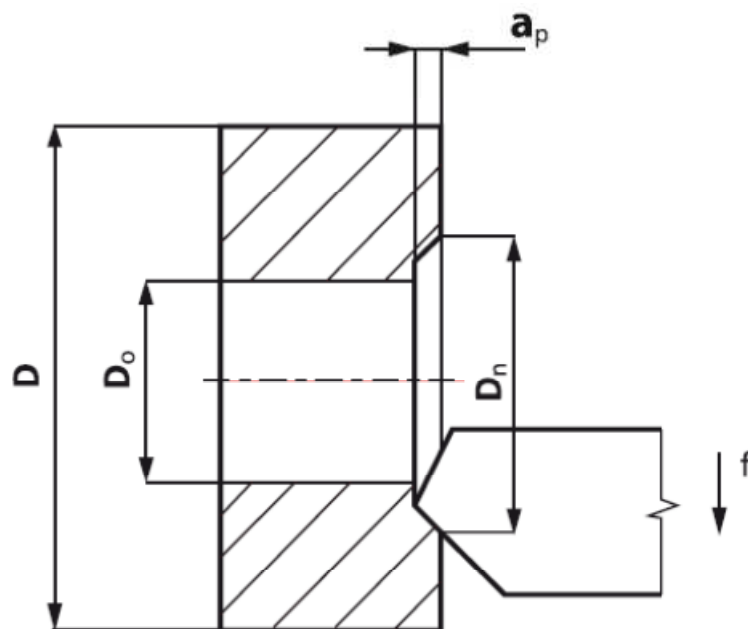
Čelní krátkodobá zkouška

Při této zkoušce se soustruží mezikruží na čele disku o průměrech D_o a D . Začíná se soustružit při konstantních otáčkách, posuvu a hloubce řezu z průměru D_o . S rostoucím obráběným průměrem narůstá i řezná rychlost. Zkoumá se, na jakém průměru D_n dosáhne nástroj předem určené hodnoty opotřebení. Princip je ukázán na Obr. 1-7. Poté se porovnávají hodnoty řezné rychlosti zkoumaného materiálu a odpovídající etalonový materiál. Nevýhoda je zde nutnost výroby obrobku s velkým průměrem vzhledem k délce.

$$K_v = \frac{V_{c\ zk}}{V_{c\ et}}$$

$v_{c\ zk}$... řezná rychlost zkoumaného materiálu ($m \cdot min^{-1}$)

$v_{c\ et}$... řezná rychlost etalonového materiálu ($m \cdot min^{-1}$)



Obr. 1-7 Princip krátkodobé čelní zkoušky [6]

Mikrozkouška obrobiteľnosti

Tato zkouška se používá zejména u nástrojů, které mají lapované funkční plochy. Výrazně se tím snižuje velikost opotřebení v začáteční fázi obrábění a lze tak dostat hodnoty potřebné pro sestavení závislosti $T_n = f(v_c)$ v rychlém čase a při malé spotřebě obráběného materiálu. Vychází z hodnot otupení na hřbetu $VB_B = 0,1$ mm. Tím pádem, příslušné závislosti $T_n - v_c$ jsou vlastně rovnoběžky.

Snížení míry opotřebení

Testování za snížené míry opotřebení vychází z dlouhodobé zkoušky obrobiteľnosti. Nezaručuje ovšem úplnou objektivitu hodnocení indexu obrobiteľnosti. Kvůli její časové náročnosti se volí kritérium obrobiteľnosti v_{c5} , což znamená obrábění řeznou rychlostí po dobu 5 min a mezní míra opotřebení je 0,2 – 0,3 mm. Jiná literatura zas uvádí mezní míru opotřebení 0,1 – 0,25 mm. Lze tak dosáhnout sníženou trvanlivostí a krátkodobostí zkoušky.

Použití nástroje se sníženou řezivostí

Řezivost nástroje lze snížit vhodným tepelným zpracováním, což způsobí rychlejší opotřebování nástroje v porovnání s původním, při stejných řezných podmínkách. Druhá možnost je úprava břitu nástroje, kdy je malý úhel špičky a břitu.

Zvýšení řezné rychlosti

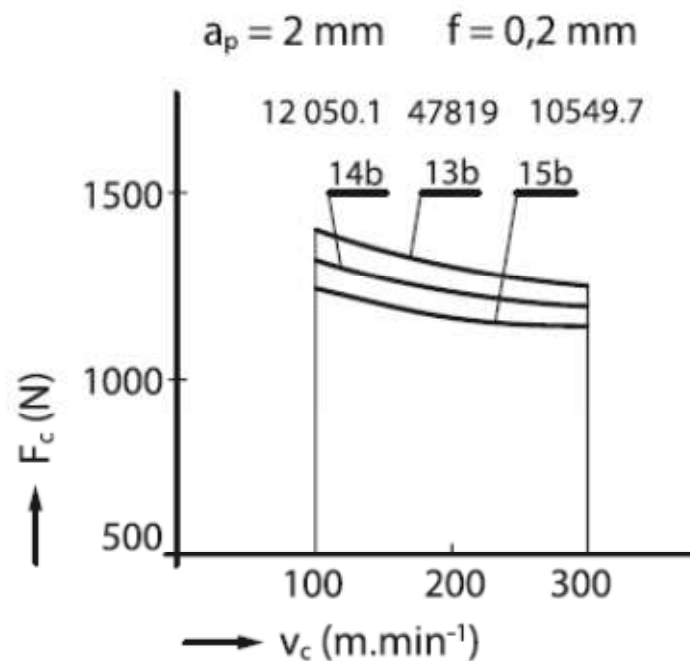
Při zvýšené řezné rychlosti než se běžně doporučuje, se dosahuje nižší trvanlivosti a tím i krátkodobostí zkoušky.

Nepřímé metody:

Metoda vycházející ze známého vztahu mezi opotřebením břitu a parametry, které charakterizují řezný proces.

Dynamická metoda

Podstata této zkoušky spočívá v následující teoreticky a experimentálně potvrzené skutečnosti, že houževnatější materiál, při identických řezných podmínkách a dalších parametrech obrábění, klade větší měrný řezný odpor. Vychází z dlouhodobé zkoušky, kde se otestuje etalonový materiál a zatím neznámý hutní materiál, lze pak stanovit příslušné závislosti. Průběh závislosti řezné složky síly obrábění F_c na řezné rychlosti v_c je znázorněn na Obr. 1-8.



Obr. 1-8 Závislost řezné složky síly obrábění na řezné rychlosti [6]

Měření tvrdosti obrobku

Při této nepřímé zkoušce se vtlačuje kužel z tvrdokovu do materiálu a měří se průměr vtisku jak etalonového materiálu, tak i zkoumaného vzorku. Index obrobitelnosti se dále určí ze vztahu:

$$K_v = \frac{d_e}{d_{zk}}$$

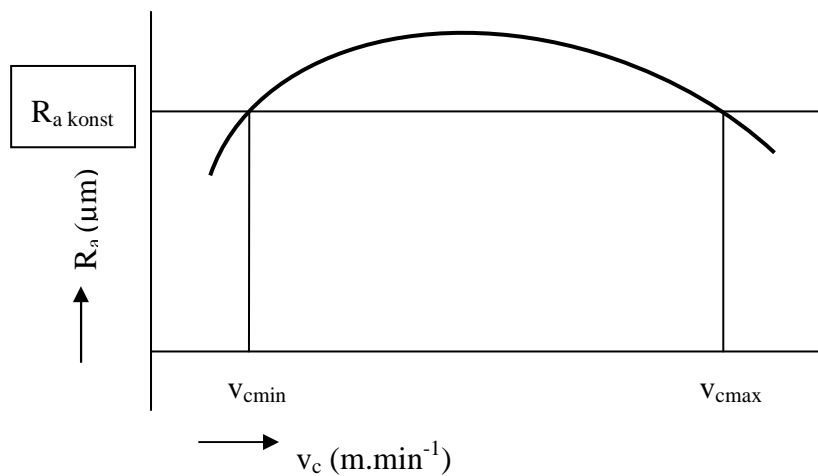
d_e ... průměr vtisku do etalonového materiálu (mm)

d_{zk} ... průměr vtisku do zkoumaného materiálu (mm)

Výhoda této metody je nenáročnost na velikost etalonového i zkoumaného materiálu a možnost použití klasických tvrdoměrů.

Mikrometrická metoda

Hodnocení spočívá v porovnání rozdílu maximálních a minimálních řezných rychlostí zkoumaného a referenčního materiálu při stejných hodnotách drsnosti. Jedná se pouze o doplňkové měření a nelze jej použít jako samotné kritérium. Určení obrobitelnosti touto metodou bývá obtížné, pokud je odlišná závislost mezi řeznou rychlostí a R_a (Obr. 1-9).

Obr. 1-9 Závislost mezi R_a a řeznou rychlostí [6]

Index obrobitelnosti se tedy určí ze vztahu:

$$K_v = \frac{(v_{c \max} - v_{c \min})e}{(v_{c \max} - v_{c \min})zk}$$

$(v_{c \max} - v_{c \min})_e$... rozdíl řezných rychlostí etalonového materiálu (m.min^{-1})

$(v_{c \max} - v_{c \min})_{zk}$... rozdíl řezných rychlostí zkoušeného materiálu (m.min^{-1})

Porovnání tvaru třísky

Zkouška je založená na porovnání tvaru a druhu třísky. Zkoumá se poloměr svinované třísky, koeficient pýchování třísky a mnoho dalších činitelů při stejných řezných podmínkách. Podobně jako mikrometrická metoda je toto měření pouze doplňkové. Užívá se většinou u automatových ocelí či obrábění daného materiálu na automatech nebo poloautomatech. Index obrobitelnosti se získá ze vztahu:

$$K_v = \frac{r_{te}}{r_{tzk}} = \frac{K_{zk}}{K_e}$$

r_{te} ... poloměr svinované třísky etalonového materiálu (mm)

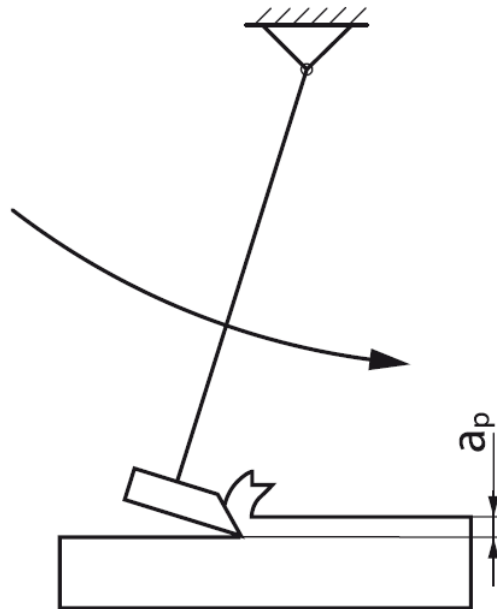
r_{tzk} ... poloměr svinované třísky zkoumaného materiálu (mm)

K_{zk} ... koeficient pýchování třísky testovaného materiálu

K_e ... koeficient pýchování třísky referenčního materiálu

Leyensetterova metoda

Toto hodnocení je obdoba Charpyho kladiva. Nůž, který je připevněn na kyvadle, vyrývá do vzorku žlábk, který je nutný pro určení obrobitelnosti (Obr. 1-10).



Obr. 1-10 Princip Leyensetterovy metody [6]

Index obrobitelnosti je dán velikostí žlábk, eventuálně hloubkou vniknutí nože do obou materiálů při jeho spuštění z určité výšky. Index obrobitelnosti je následující:

$$K_v = \frac{a_{pzk}}{a_{pe}}$$

a_{pzk} ... hloubka vniknutí nože do zkoumaného materiálu (mm)

a_{pe} ... hloubka vniknutí nože do referenčního materiálu (mm)

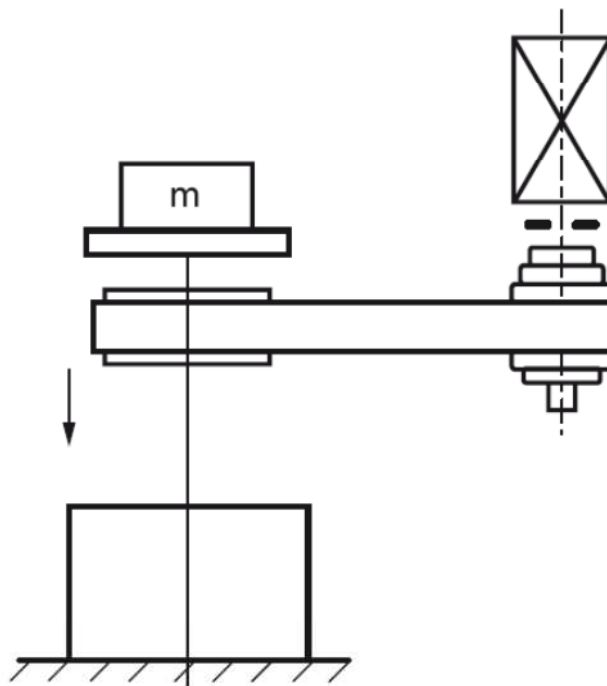
Vrtání při konstantním tlaku

Testování metodou vrtání při konstantním tlaku se zakládá v měření hloubky vyvrtaného otvoru až do otupení vrtáku. Hloubka se měří v referenčním i ve zkoumaném materiálu. Index obrobitelnosti se určí:

$$K_v = \frac{h_{zk}}{h_e}$$

h_{zk} ... vyvrtaná hloubka otvoru do zkoušeného materiálu (mm)

h_e ... vyvrtaná hloubka otvoru do referenčního materiálu (mm)



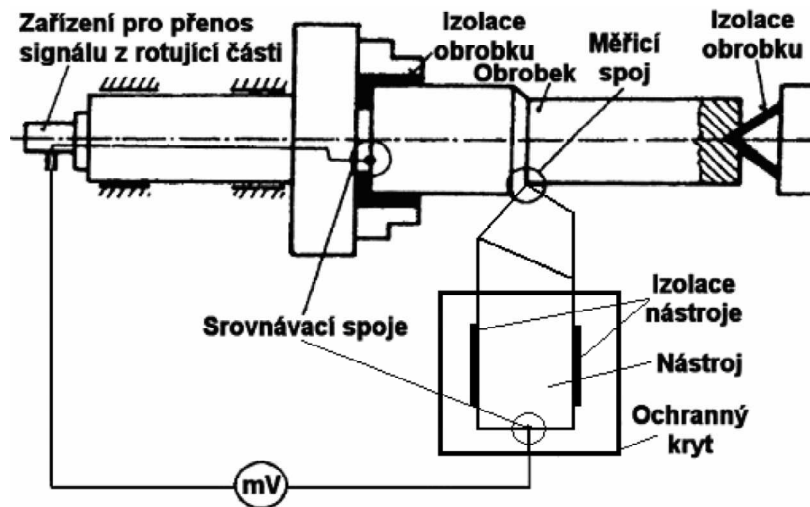
Obr. 1-11 Princip metody vrtání při konstantním tlaku [6]

Paralela této zkoušky je vrtání při konstantní posunové síle, při dané řezné rychlosti a průměru nástroje. Vždy se vrtá do konstantní hloubky a zároveň se měří čas vrtání. Jako kritériem pro stanovení hodnoty obrobiteľnosti se používá čas vrtání, nebo častěji velikost posuvu. Čím vyšší velikost posuvu, tím lze dosáhnout lepší obrobiteľnosti daného materiálu. Tato metoda je časově velmi nenáročná.

Pomocí teploty řezání

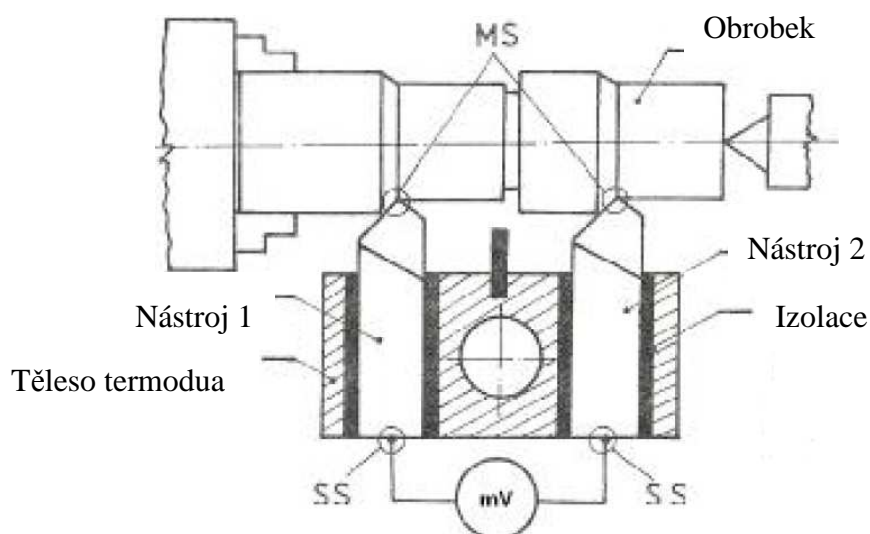
Při této zkoušce se měří teplota řezání při obrábění etalonového a zkoumaného materiálu při stejných pracovních podmínkách. Metoda je velmi objektivní, ale nevýhodou zde je, že ji lze aplikovat vždy jen na jedné skupině materiálu. Testování probíhá za konstantních řezných podmínek a to dvěma způsoby.

První způsob je metoda přirozeného termočláneku (Obr. 1-12). [6] Termočlánek je bez přídavného cizího vodiče, jen materiál obrobku a nástroje jsou vodiči. V místě dotyku nástroje s obrobkem je měřící spoj. Termoelektrické napětí je potom úměrné střední teplotě v oblasti styku – teplotě řezání. Nutnou podmínkou je vzájemné odizolování nástroje a obrobku. U běžného měření stačí odizolovat nástroj od obráběcího stroje, avšak pro větší přesnost a spolehlivost je vhodné odizolovat i obrobek.



Obr. 1-12 Metoda přirozeného termočlánu [5]

Druhý způsob je měření pomocí termodua (Obr. 1-13), který spočívá v současném záběru dvou nástrojů z odlišných materiálů, shodné geometrie a při stejných pracovních podmínkách, které spolu tvoří termočlánek. Obráběný materiál vytváří s každým z nástrojů měřicí spoj a funguje jako tepelný a elektrický vodič. Aby termoelektrické napětí bylo uspokojivě velké a spolehlivě měřitelné, musí mít materiály obou nástrojů odlišné chemické složení. Vhodná a častá používaná dvojice nástrojů je z rychlořezné oceli a slinutého karbidu. Opět nutnou podmínkou pro správnou funkci je odizolování obou nástrojů od stroje a mezi sebou. [5]



Obr. 1-13 Měření pomocí termodua [5]

Toto hodnocení je vhodné provádět při konstantním průřezu třísky ($a_p, f = \text{konst}$) a také při třech a více hodnotách řezné rychlosti. Pokud je nízká teplota řezání, má to pozitivní vliv na stupeň obrobitelnosti daného materiálu. Výhodou této metody je velmi malá spotřeba materiálu. Index obrobitelnosti lze určit:

$$K_v = \frac{\Theta_e}{\Theta_{zk}}$$

Θ_e ... střední teplota řezání etalonového materiálu (°C)

Θ_{zk} ... střední teplota řezání zkoumaného materiálu (°C)

Měření hloubky zpevněné vrstvy

Princip poslední zmiňované metody je v měření mikrotvrdosti zpevněné vrstvy těsně pod povrchovou vrstvou etalonového a zkoumaného materiálu. Index obrobitelnosti je stanoven:

$$K_v = \frac{HM_e}{HM_{zk}}$$

HM_e ... hloubka zpevněné vrstvy etalonového materiálu (μm)

HM_{zk} ... hloubka zpevněné vrstvy testovaného materiálu (μm) [6]

2 Analýza současného stavu

2.1 Obráběné materiály

Nejčastější používané materiály obrobků, které se obrábí reznými nástroji, jsou slitiny železa, hliníku, mědi a niklu. Jejich mechanické vlastnosti a obrobitelnost, v porovnání se základními kovy zásadně liší. Pokud dva materiály mají podobné chemické složení, ale různou strukturu, opět je jejich obrobitelnost velmi odlišná. Také kvalita a výrobní proces určuje obrobitelnost. [1]

2.1.1 Ocel

U slitin železa je zřejmé, že hlavní složkou je železo. Dalším velmi důležitým prvkem ve slitinách je uhlík. Procentuální obsah uhlíku v oceli je 0,05 – 2 %. Pokud podíl uhlíku překročí 2 %, jedná se o šedou litinu. Uhlíková ocel může být nelegovaná, kdy obsahuje pouze železo a uhlík nebo legovaná, která kromě těchto dvou prvků obsahuje i další legující složky. Vlastnosti ocelí závisí na obsahu uhlíku, na druhu a množství legujících prvků, ale také na způsobu tepelného zpracování. Oceli, které mají podíl uhlíku pod 0,8 %, jsou podeutektoidní a s obsahem nad 0,8 % se nazývají nadeutektoidní.

Nelegovaná ocel se dle podílu uhlíku rozděluje na ocel zvlášť nízkouhlíkovou (0,05 – 0,1 %), ocel nízkouhlíkovou (0,1 – 0,25 %), dále na ocel se středním obsahem uhlíku (0,25 – 0,55 %) a ocel s vysokým obsahem uhlíku (0,55 – 0,8 %). Obrobitelnost nízkouhlíkových ocelí je velmi špatná, neboť mají malou tvrdost a tvárnost a z toho důvodu dochází při obrábění k mazání materiálu a k tvorbě nárůstků, dále se zkracuje trvanlivost a zhoršuje se jakost obrobeného povrchu obrobku. Čím vyšší obsah uhlíku, tím se obrobitelnost zlepšuje. Tvrdost se mírně zvyšuje a současně klesá tvárnost. Do této skupiny, pro zlepšení obrobitelnosti, se přidávají přísady, např. mangan, který má velmi pozitivní vliv. Jeho obsah je však menší než 2 %, proto ho nelze považovat za legující prvek.

Legovaná ocel, která má obsah legujících prvků pod 5 % je nazývána nízkolegovanou a ocel s podílem legur nad 5 % je vysoce legovaná ocel. Tyto oceli jsou převážně stabilnější a tvrdší v porovnání s uhlíkovou ocelí obvyklé jakosti. Vysoký podíl legujících prvků zvyšuje pevnost, a proto lze zaznamenat zhoršenou obrobitelnost. Běžný podíl legujících prvků je méně než 1 % a používají se proto, že mají trvalý vliv na strukturu slitin a na jejich přeměnu,

eutektoidní bod, dále na pevnost, tvrdost, odolnost proti opotřebení a korozi. K nezákladnějším přísadám patří nikl, chrom a molybden. Dále se v mnoha ocelí vyskytuje také vanad, wolfram a kobalt. Vlastnosti oceli se dají zlepšit také olovem, křemíkem, manganem atd. Pro dobrou obrobiteľnosť legovaných ocelí je důležité vhodné tepelné zpracování. Některé druhy vysoce legovaných ocelí je nutné žíhat dřív, než se začnou zpracovávat. Je to z toho důvodu, aby se dosáhlo vhodné tvrdosti pro uspokojivé obrábění nástroji ze slinutých karbidů.

Korozivzdorná ocel je samostatný druh materiálu. Hlavní legující prvek je chrom. S jeho rostoucím obsahem se zvyšuje odolnost proti korozi a oxidaci. Pokud je dostatečně vysoký podíl uhlíku je možné korozivzdorné chromové oceli kalit podobně jako uhlíkové. Dále obsahují hojné množství různých legujících prvků, které mají vliv na změnu struktury, zlepšení odolnosti proti korozi a zvýšení pevnosti. Některé vlastnosti velmi ovlivňuje struktura, především kolísavou pevnost. Dle struktury se dělí korozivzdorné oceli do tří skupin: feritické, martenzitické a austenitické. Feritické oceli jsou srovnatelné s nízkolegovanými uhlíkovými oceli, neboť se vyznačují dobrou obrobiteľností. To samé platí pro martenzitické oceli s nízkým obsahem uhlíku a chromu. Ve většině případů jsou martenzitické oceli obráběny ve stavu žíhaném naměkko nebo v zušlechťeném stavu. Austenitické oceli jsou pro obrábění méně vhodné ve srovnání s martenzitickou ocelí. Jsou charakteristické vysokým efektem zpevňování zastudena a nízkou tepelnou vodivostí. Také mají sklony k navařování na břit a nalepování se na něj při obrábění. Kvůli své malé tepelné vodivosti a malé schopnosti pohlcovat teplo vzniká vysoká teplota na břitu. Z tohoto důvodu je nezbytné chlazení v místě řezu. Na níže zobrazeném grafu (Obr. 2-1) je ukázána nejvhodnější oblast řezných podmínek, které jsou příhodné pro obrábění austenitických ocelí vyměnitelnými břitovými destičkami ze slinutých karbidů.

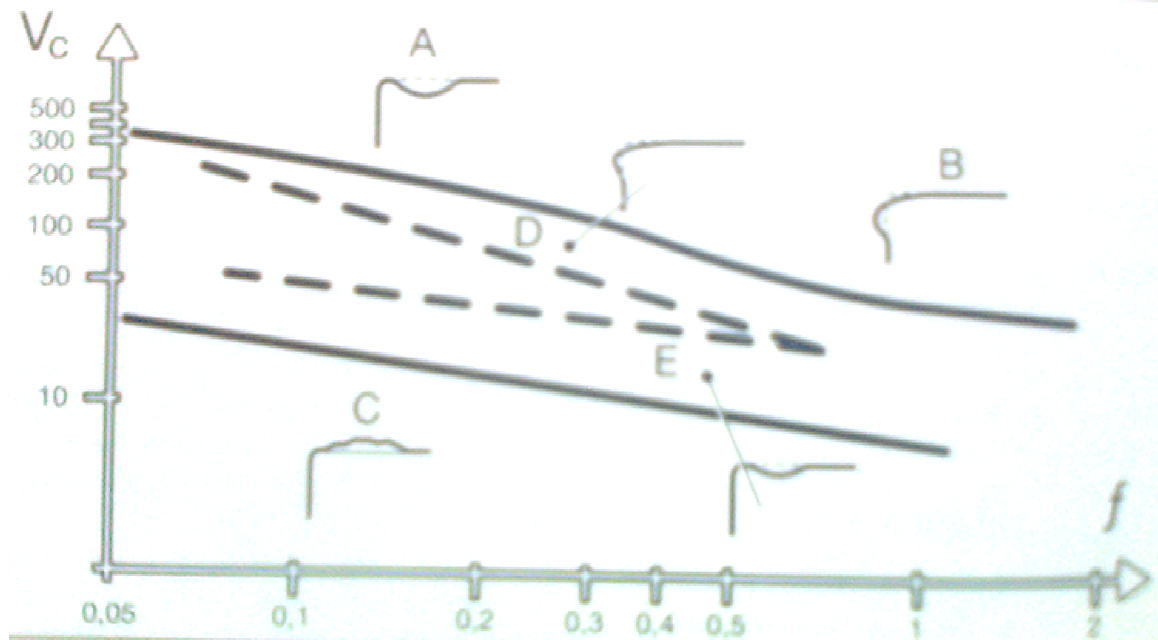
Z grafu jsou patrná různá omezení: A – vysoké opotřebení ve formě žlábků na čele

B – extrémní plastická deformace

C – vznik nárůstku na břitu při nízkých řezných rychlostech

D – sklon k plastickým deformacím

E – vysoké opotřebení ve formě žlábků na čele



Obr. 2-1 Oblast uspokojivé obrobiteľnosti [1]

Stabilizované druhy ocelí, například legované titanem, se obrábějí obtížněji, neboť titan vytvoří karbid a nitrid titanu, které zvyšují abrazivní účinky.

Užitečná hlediska při obrábění korozivzdorných ocelí:

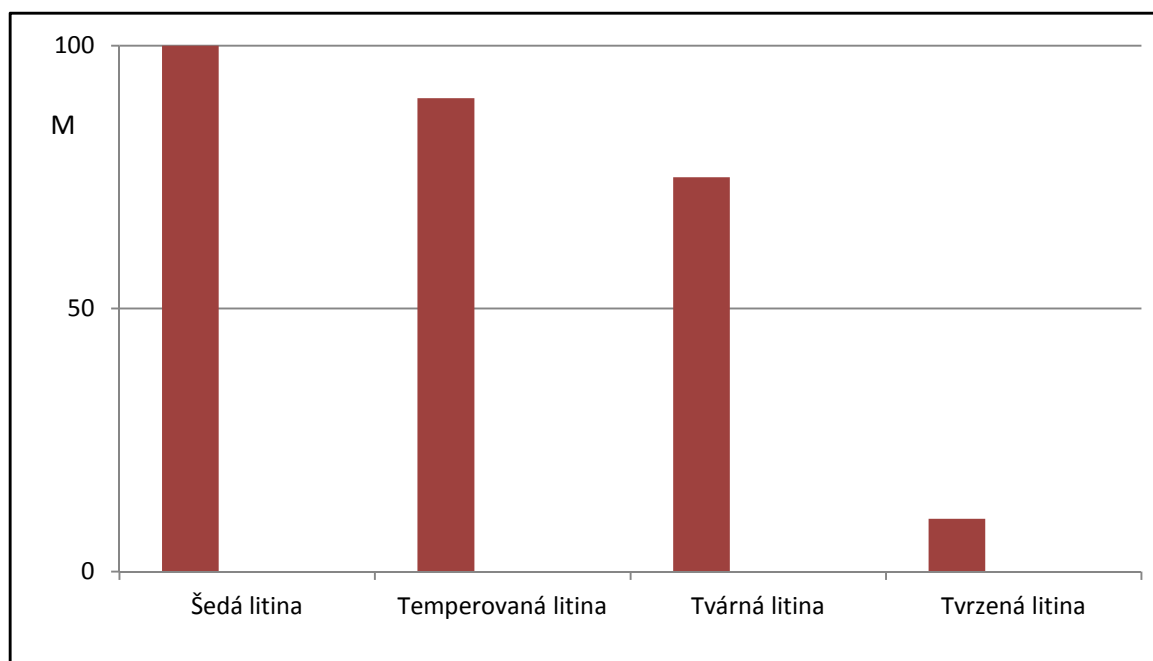
- Stabilní konstrukce, vysoká tuhost obráběcích strojů;
- spolehlivost chodu vřetene, při potřebě dostatečná podpěra;
- stabilita upnutí obrobků i nástrojů, malé vyložení nástroje;
- používat modulární nástroje s vysokou tuhostí;
- zvolení vhodného poloměru špičky nástroje a geometrie;
- při soustružení použít odpovídající chladicí kapalinu a u frézování jen při nízkých řezných rychlostech, frézovat sousledně a zabránit přerušovanému posuvu. [1]

2.1.2 Litiny

Litina je slitina železa a uhlíku (2 – 4 %), dále obsahuje legující prvky jako křemík, mangan, fosfor a síru. Přidáním niklu, chromu, molybdenu a mědi se zvyšuje odolnost proti korozi a tepelná odolnost. Typickými vlastnostmi tohoto materiálu je dobrá tuhost, pevnost v tlaku a tekutost, což je velmi důležité pro zatékání. Litiny, podle druhu struktury jsou

feritické, perlitické a nebo smíšené feriticko – perlitické. Pokud je litina jen feritická, případně s malým obsahem perlitu, tak je snadno obrobitelná. Charakterizují se nízkou pevností a tvrdostí. Proto také mají sklon k nalepování a k vytváření nárůstku na břitu. Pokud je tato litina legována vyšším obsahem křemíku, je poté stabilnější a méně tvárná a tím pádem se snižuje riziko tvorby nárůstku. Pokud narůstá v základní hmotě podíl perlitu, tak na jedné straně se zvyšuje pevnost a tvrdost a na straně druhé se zhoršuje obrobitelnost. Také záleží jaké lamely a zrna má perlit. Jestliže jsou jemné, opět se zvyšuje jeho pevnost a tvrdost a tím se negativně projeví na obrobitelnost. Povrch odlitku se někdy obrábí hůře, neboť licí kůra obsahuje mnoho nečistot. V tekuté litině vyplavou nahoru a v horní vrstvě se koncentrují.

Hlavní druhy litiny jsou šedá, tvárná, grafitová, temperovaná a legovaná litina. Liší především v podobě uhlíku, ve které se nachází. Na grafu Graf 2-1 je znázorněna obecná relativní obrobitelnost (M) čtyř výše uvedených druhů litiny.



Graf 2-1 Zobrazení obecné relativní obrobitelnosti pro různé typy litin [1]

Jestli se litina opracovává dobře nebo naopak špatně závisí hlavně na druhu její struktury. Všeobecně lze obrobitelnost litiny označit za dobrou. [1]

2.1.3 Hliník

Tento prvek se ve většině případů používá ve formě slitin. Čistý hliník, kvůli své nestabilitě a snadné tvářitelnosti, je pro obrábění nevhodný. Vlastnosti hliníku a jeho slitin

závisí podle jakého způsobu je materiál předpracován. Slitiny se dělí na tvářené a slévatelné, mimo to na tepelně zpracovatelné, nezpracovatelné a zastudena vytvrditelné. Hlavními legujícími prvky jsou měď, která zvyšuje pevnost a zlepšuje slévatelnost, mangan zlepšující tvárnost a slévatelnost, křemík, který působí na zlepšení korozivzdornosti a slévatelnosti, hořčík působící pozitivně na pevnost a korozivzdornost, zinek, který zvyšuje pevnost a tvrdost a železo zajišťující pevnost a tvrdost. Slitiny hliníku mají dobrou obrobiteľnosť. Je možné používať vysoké rezné rýchlosti, neboť pracovní teploty jsou nízké. U obrábění slitin hliníku je důležité věnovat pečlivou pozornost vznikající tříšce. Používají se speciální ostré pozitivní břity pro zpracování hliníku, které zaručují dobrý odchod třísky a snižují vznik nárustku. Obrobiteľnosť výkovek a odlitků ze slitin hliníků je lepší, pokud jsou tyto materiály zušlechťeny při vyšší teplotě, než kdyby byly pouze vyžihány. [1]

2.1.4 Měď

Obrobiteľnosť slitin mědi, jako jsou mosaz a bronz, je v rozmezí od lehké až po obtížnou. Čistá měď je charakteristická snadnou tvářitelností, kovatelností a má vysoký stupeň tepelné vodivosti. Mosaz je na bázi mědi s vysokým podílem zinku a je možné rozlišovat lité, kované, tepelně a zastudena tvářené druhy mosazi. Přidáváním olova se obrobiteľnosť výrazně zlepšuje. Produkty z bronzu se také vytváří buď tvářením, nebo litím. Olovnatý bronz má velmi dobrou obrobiteľnosť, zato hliníkový, křemíkový, beryliový, a fosforový mohou klást větší požadavky na obrábění. [1]

2.1.5 Nikl

Nikl se používá nejen jako legující prvek, ale také jako slitina, která se vyznačuje vysokou pevností, korozivzdorností a žáruvzdorností. Čistý nikl je velmi stabilní a dá se zpracovávat jak zatepla, tak i zastudena. Většinou se používá k poniklování oceli. Slitiny dělíme na slitinu nikl/měď, slitinu nikl/chrom/železo a slitinu nikl/titan. Většina těchto slitin je ale známá pod obchodním označením jako například: Inco, Monel, Inconel, Incoloy, Nilo, René atd. Většina z nich patří ke kovům HSTR, které se uplatňují v leteckém a kosmickém průmyslu. Slitiny niklu jsou buď tvářené, nebo lité a je známo mnoho postupů pro zpracování niklu, jako žihání na měkko, rozpouštěcí žihání, precipitační vytvrzování a žihání na snížení pnutí. Slitiny niklu kladou velké nároky na obrábění. Vznikají vysoké teploty a kombinace tepla s reznými silami způsobuje opotřebení břitu. Právě slitiny mědi, patří k materiálům,

kteří jsou nejobtížněji obrobitelné. Proto jsou vyžadovány optimalizované nástroje ze slinutého karbidu nebo keramiky a také dodržení správných podmínek obrábění, aby se dosáhlo uspokojivých výsledků. [1]

2.2 Obrábění tvrdých materiálů

Pokud se hovoří o tvrdém obrábění, jedná se o materiály obrobků s tvrdostí 50 – 60 HRC. Dříve tyto materiály bylo možné pouze brousit nebo obrábět při velmi nízkých řezných rychlostech. Dnes, díky vývoji moderních řezných materiálů, mohou být i ty nejtvrďší výrobky třískově opracovány. Byla zvýšena jak produktivita, tak i spolehlivost obrábění. Nástroj pro obrábění tvrdých materiálů se volí dle přísných požadavků, které se určují podle obrobku. Nejčastěji se používají nástroje ze slinutých karbidů, avšak někdy je potřeba sáhnout po speciálně vyvinutých řezných materiálech, aby byly splněny veškeré požadavky. Jsou to například různé druhy keramických nástrojů a materiály z kubického nitridu bóru.

Obtíže, které mohou nastat při obrábění tvrdých materiálů, jsou následující:

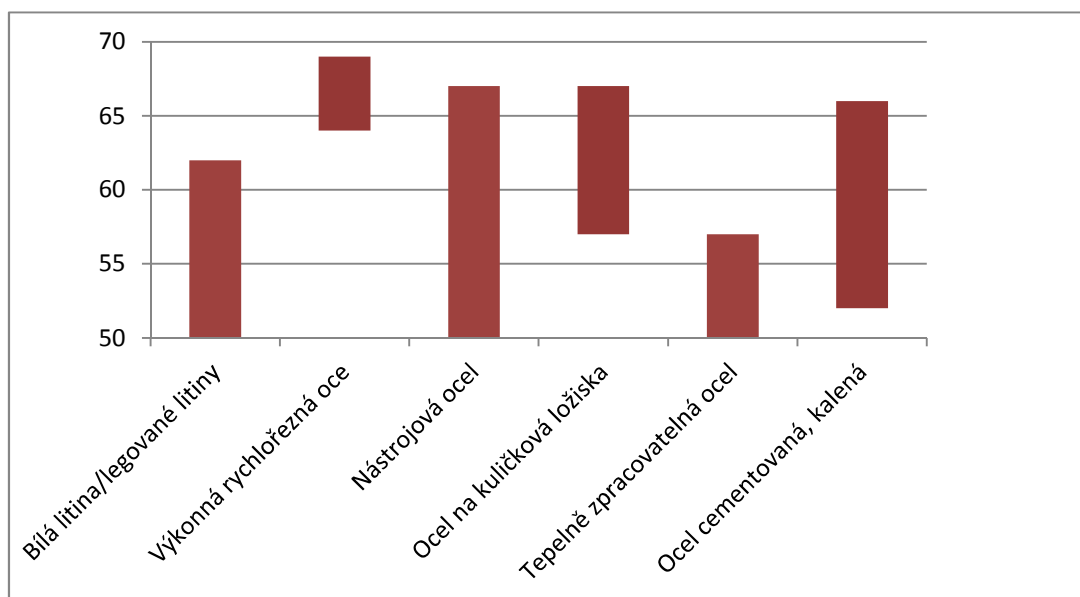
- Vysoké teploty v místě řezu;
- vyšší a proměnlivá velikost řezných sil;
- vysoký tlak na malý průřez třísky v blízkosti ostří;
- rychlé opotřebení břitu, tvorba trhlin a vydrolování břitu;
- pnutí v obrobku v průběhu obrábění;
- špatná homogenita materiálu obrobku;
- nedostatečná stabilita.

Volba typu, geometrie a materiálu břitové destičky je ovlivněna vysokými teplotami a mechanickým zatížením při samotném obrábění. Na břity jsou kladeny velké požadavky, především s ohledem na:

- Odolnost proti působení abrazivního opotřebení;
- chemickou stabilitu;
- tvrdost zatepla;
- pevnost v tlaku a ohybu;
- odolnost proti difúznímu opotřebení;
- spolehlivost a houževnatost břitu.

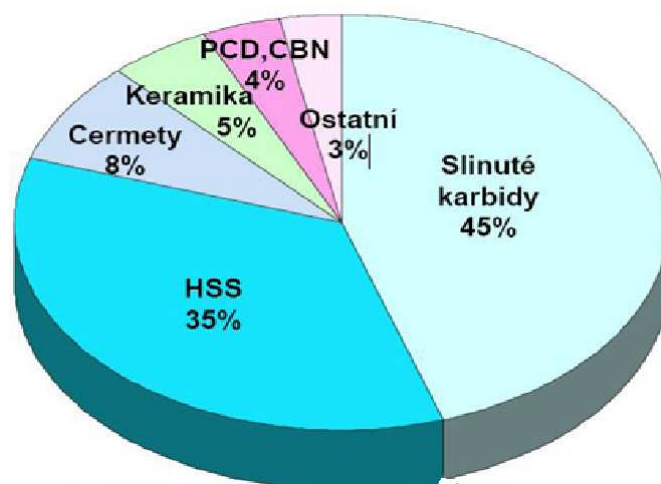
Pokud je obráběna kalená ocel, musí nástroj splňovat hlavně první tři body. U obrábění litiny, která je také velmi abrazivní, v důsledku nízkých pracovních teplot a chemické stability má jen malý význam. Přerušovaný řez vyžaduje větší spolehlivost i houževnatost bříty.

U kovu získáme tvrdost buď přeměnou výchozí struktury oceli na strukturu martenzitickou, nebo vytvářením karbidů ve struktuře. Na níže zobrazeném grafu Graf 2-2 je znázorněn rozsah tvrdosti pro hlavní druhy oceli a litiny. [1]

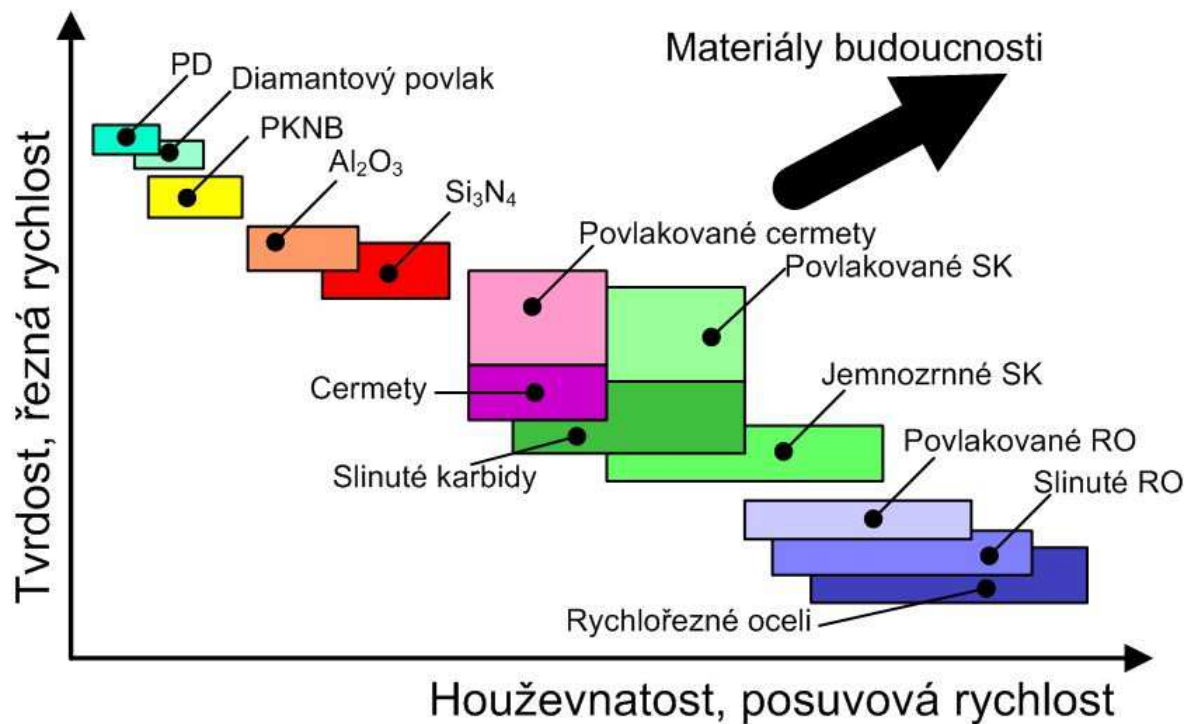


Graf 2-2 Znázornění rozsahu tvrdostí pro hlavní druhy oceli a litiny [1]

Pro obrábění tvrdých materiálů se používají následující řezné materiály:



Obr. 2-2 Použití tvrdých materiálů [7]



Obr. 2-3 Vlastnosti tvrdých materiálů [8]

2.2.1 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy jsou v dnešní době nejrozšířenější řezné materiály. Rozlišujeme nepovlakované a povlakované slinuté karbidy. Podle užití se nepovlakované karbidy rozdělují do šesti základních skupin, podle normy ISO 513 : 2002 a každá skupina se následně dělí na další podskupiny. Charakteristickými znaky jsou písmena a barvy. Slinuté karbidy jsou uspořádány podle relativního opotřebení a pevnosti. Čím nižší číslo, tím lze obrábět vyšší rychlostí a pokud je číslo vysoké, roste rychlost posuvu a pevnost řezných materiálů.



Obr. 2-4 Slinuté karbidy

P- tato skupina je určena pro materiály, které tvoří dlouhou třísku, jako například uhlíkové oceli, slitinové oceli a feritické korozivzdorné oceli. Při procesu dochází k velkým řezným

silám a opotřebením na čele. Z toho důvodu tato skupina SK obsahuje značné množství TiC a TaC, které zabraňují vymílání na čele nástroje. Ve srovnání s WC se vyznačují větší tvrdostí za vysokých teplot. Nevýhodou TiC a tuhých roztoků na bázi TiC je vyšší křehkost a nízká odolnost proti abrazi opět ve srovnání s WC .

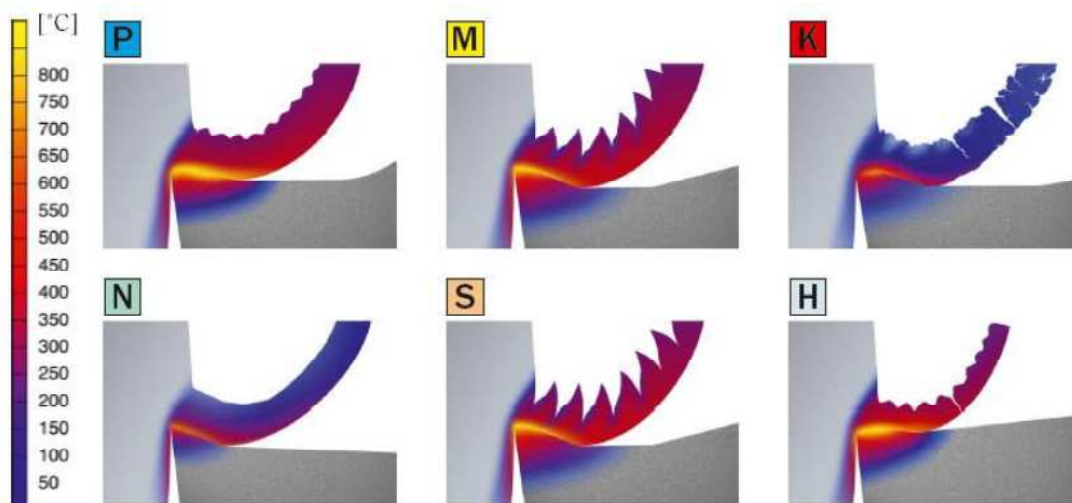
M – skupina se používá pro obrábění materiálů, které vytvářejí dlouhé a střední třísky, jako lité oceli, austenitické korozivzdorné oceli a tvárné litiny. Opět dochází k vydrolování ostří a dosahuje se středních až vysokých hodnot řezných sil.

K – v této skupině jsou zahrnuty materiály, které vytvářejí krátkou, drobnou třísku. Patří sem například šedé litiny, neželezné slitiny a nekovové materiály. Převažuje abrazní a adhezní opotřebením a řezné síly jsou relativně nízké. Tvrdou strukturální složku tvoří karbid wolframu. Při pokojové teplotě mají SK tvrdost srovnatelnou s většinou ostatních karbidů, ale s narůstající teplotou jejich hodnota velmi klesá. Proto tato skupina není vhodná pro obrábění materiálu, které tvoří dlouhou třísku, neboť mnohem více tepelně zatěžuje čelo nástroje. [9]

N - tato skupina je vymezena pro obrábění neželezných kovů, zejména hliníku, mědi a jejich slitiny.

S – skupina je určeno pro tepelně odolné slitiny na bázi železa, niklu a kobaltu, titanu a jejich slitiny

H – jsou vhodné pro obrábění kalených a velmi tvrdých ocelí (HRC 48 – 60), tvrzených a kalených litin. Další charakteristikou této skupiny je značná odolnost proti opotřebením a tepelná vodivost. [5]



Obr. 2-5 Řez břitovou destičkou ze slinutého karbidu při obrábění různých materiálů [10]


Povlakování se stalo velmi významné pro zlepšování vlastností vyměnitelných břitových destiček pro řezné nástroje. Původně stačilo jen pár druhů povlaků, ale postupem času z hlediska rostoucích požadavků, bylo každoročně vyvíjeno a zdokonalováno mnoho nových typů povlakovaných slinutých karbidů. Rozdíl je mezi nimi v druhu povlaku, kombinaci vrstev, tloušťce povlaku, metodě povlakování, substrátu, atd.



Obr. 2-6 Povlakované slinuté karbidy [10]

Vývojové stupně povlakovaných slinutých karbidů:

- 1. generace – jedná se o jednovrstvý povlak (převážně TiC) s tloušťkou okolo 6 μm a špatnou soudržností s podkladem. Při obrábění těmito nástroji docházelo k rychlému odlupování povlaku a nástroj byl tím znehodnocen.
- 2. generace – opět jednovrstvý povlak (TiC, TiCN, TiN). Zdokonalená technologie výroby umožňuje vytvářet vrstvy povlaků o větších tloušťkách (7 až 10 μm), aniž by byly odlupovány při procesu obrábění.
- 3. generace – vícevrstvý povlak s ostře ohraničenými přechody mezi vrstvami. Jejich pořadí je většinou takové, že první vrstva by měla mít dobrou přilnavost k podkladu a obecně horší odolnost proti opotřebení. Od poslední vrstvy je požadována vysoká tvrdost a odolnost proti opotřebení a oxidaci za zvýšených teplot.
- 4. generace – jsou speciální vícevrstvé povlaky, které mají více nebo méně výrazné přechody mezi jednotlivými vrstvami. Velkou výhodou je schopnost odklánět a zpomalovat šíření trhlin od povrchu povlaku k substrátu. Do kategorie povlaků 4. generace patří také diamantové, nanokompozitní, gradientní, supermřížkové apod.

Hodnocení	Chemická stabilita	Odolnost proti oxidaci	Tvrдость	Tvrдость za tepla
Nejlepší  Špatná	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiC	Al ₂ O ₃
	TiAlN	TiAlN	TiCN	TiAlN
	TiN	TiN	Al ₂ O ₃	TiN
	TiCN	TiCN	TiAlN	TiCN
	TiC	TiC	TiN	TiC

Obr. 2-7 Vlastnosti povlaků [9]

TiC má největší tvrdost a také odolnost vůči abrazivnímu opotřebení, naopak TiN je zase měkčí a z toho důvodu i méně otěruvzdorný, ale termodynamicky stabilní a odolný proti vymílání na čele břitu. Al₂O₃ je charakteristický největší otěruvzdorností při vysokých teplotách a tím pádem při vysokých řezných rychlostech. Plyne s toho, že vícevrstvá technologie má velký význam pro optimální kombinaci vlastností povlakovaných destiček. V dnešní době je možné, na všechny řezné nástroje, aplikovat tvrdou a otěruvzdornou povrchovou vrstvu. Nejčastěji jsou používány vrstvy třetí či čtvrté generace. [9]

2.2.2 Cermety

Termín cermet se složil ze slova CERamics a METal a mělo by se od tohoto materiálu očekávat kombinace vysoké tvrdosti keramiky a houževnatosti kovu. Realita je podstatně odlišná, neboť takový materiál se zatím vyrobit nepodařilo. Cermety poskytují vyšší řezné rychlosti při obrábění, ve srovnání s konvenčními slinutými karbidy, protože TiC je stabilnější než WC.

První generace cermetů TiC – Mo – Ni a TiC – Mo₂C – Ni se používaly pouze na oblast lehkého řezání. Dnes se tyto řezné materiály téměř nepoužívají. Při další výrobě cermetů se věnovala pozornost pevnosti a odolnosti proti vydrolování. Tyto vlastnosti byly zlepšeny přidáním TaC a WC. Užití se rozšířilo na soustružení středními hodnotami posuvové rychlosti a lehké frézování. Současná generace cermetů je založená na kombinaci TiC – TiN. Podíl TiC byl nahrazován TiN. Sice vzrostla tvrdost, ale na druhou stranu se zvýšila zbytková pórovitost, což se projevilo poklesem ohybové pevnosti. Pokud jsou pozorným řízením výrobního procesu vyloučeny póry, stávají se cermety tohoto typu velmi vhodným řezným materiálem. V porovnání s předchozími generacemi cermetů vykazují vyšší odolnost proti opotřebení a vydrolování, z toho důvodů jsou nejčastěji používány. [9] K dalším výhodám

patří také vysoká chemická stabilita, malý sklon k vytváření nárůstku a oxidačnímu opotřebení.

Z relativně křehkého počátečního stadia dostaly cermety vyšší houževnatost a jsou tak vhodným nástrojem pro velmi obtížné operace. Nejen pro jemné dokončování, ale i pro frézování, soustružení korozivzdorných ocelí atd. S výhodou se používají při velkých řezných rychlostech, malých posuvech a hloubkách řezu tam, kde je důležitá přesnost rozměrů a jakost obrobeného povrchu.

Pokud jsou cermety používány na náročnější předhrubovací a hrubovací operace vyskytují se následující nevýhody:

- Malá pevnost břitu při středních a vyšších posuv;
- malá houževnatost při střídavém středním až těžkém zatížení břitu;
- malá odolnost proti abrazivnímu opotřebení;
- malá odolnost proti opotřebení na čele ve tvaru žlábků;
- malá odolnost proti nárazovému zatížení. [1]

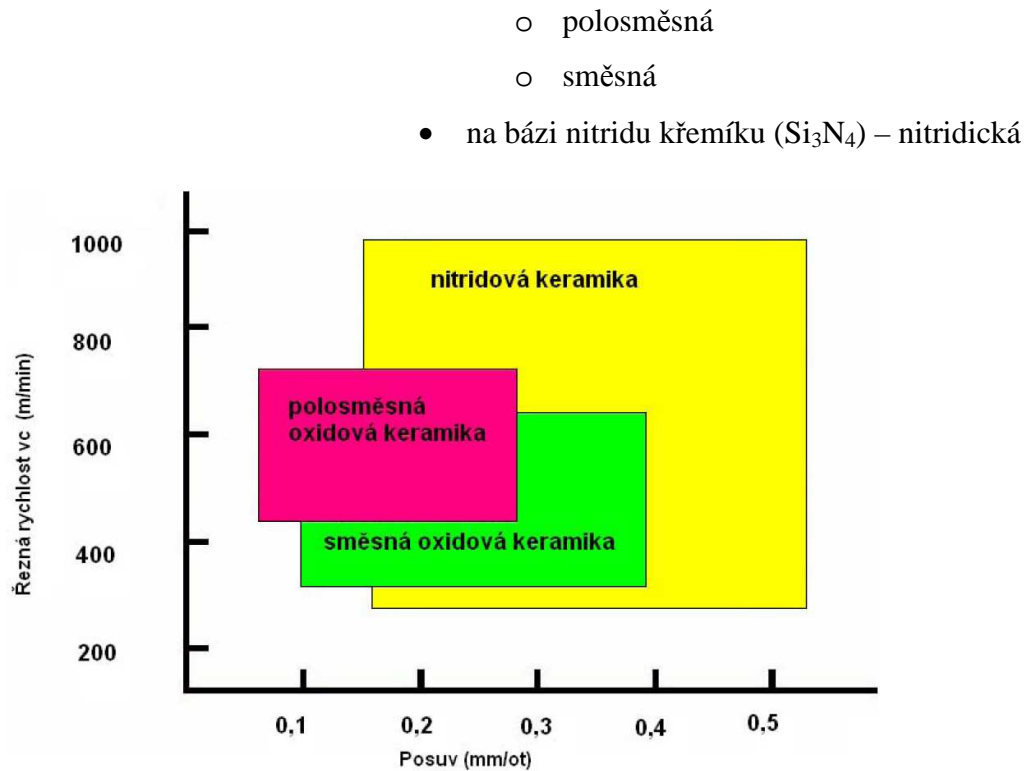
2.2.3 Keramika

Pod názvem keramika lze nalézt velký počet různých řezných materiálů. Keramické řezné materiály jsou velmi tvrdé, mají vysokou tvrdost zatepla a chemickou odolnost. Vyznačují se vysokou trvanlivostí a mohou být použity při vysokých řezných rychlostech. Pokud je nástroj vhodně používán, dosahuje se velkého objemu odebraného materiálu. Přes všechny svoje výhody je řezná keramika málo používána, neboť zastává funkci většinou jen při obrábění šedé litiny, tvrdých ocelí a žáruvzdorných slitin.

Hlavní rozdíl mezi oxidickou keramikou a ocelí je hustota, která u keramiky činí pouze cca 1/3 hustoty oceli, dále velká pevnost v tlaku vůči pevnosti v tahu, kdy tento rozdíl u oceli je podstatně menší. U keramiky nedochází k plastické deformaci, proto je ve srovnání s ocelí velmi křehká. Má dvojnásobný modul pružnosti a velmi nízkou tepelnou vodivost oproti oceli.

Keramika existuje ve dvou základních typech:

- na bázi oxidu hlinitého (Al_2O_3) – oxidová
 - čistá



Obr. 2-8 Graf závislosti řezné rychlosti na posuv [7]



Obr. 2-9 Porovnání řezné keramiky [10]

Čistá oxidová keramika má velmi vysokou tvrdost, otěruvzdornost a výbornou chemickou odolnost, naopak má relativně nízkou pevnost, houževnatost a velmi malou tepelnou vodivost. Kvůli těmto nevýhodným vlastnostem dochází při obrábění kovů k vylamování břitů při špatných řezných podmínkách. Nepříznivé vlastnosti čisté keramiky lze zlepšit přidáním malého množství oxidu zirkoničitého (ZrO_2). Ten výrazně zlepšuje její houževnatost. Z důvodu malé tepelné vodivosti, tím pádem také náchylnosti proti tepelným šokům se nedoporučují chladicí prostředky při obrábění. Tvrdost, hustota, velikost zrna a v neposlední řadě množství přidaného zirkonu určuje rozsah použití. Většinou se uplatňuje k obrábění litin a ocelí. Jakákoliv porezita snižuje výkon nástroje.

Polosměsná keramika obsahuje 15 – 20 % oxidu zirkoničitého a další různé kovové složky např. oxid kobaltnatý CoO . V porovnání s čistou keramikou je tento materiál pevnější, houževnatější a má menší náchylnost proti lomu.

Směsná keramika má vyšší odolnost proti tepelným rázům díky přísadě TiC a přísada TiN nejen že vylepšuje odolnost proti teplotním šokům, tak zároveň zvyšuje pevnostní vlastnosti. Dále také zabezpečují stabilitu mechanických vlastností při vysokých teplotách. Kombinace vyšší tvrdosti s houževnatostí velmi zvyšuje odolnost proti abrazivnímu a erozivnímu opotřebení. Obvykle se používá pro dokončovací operace a obrábění tvrdých kalených ocelí. [1] [7] [10]

Dále také existuje vyztužená keramika, která je zpevněná monokrystaly křemíku nebo-li whiskery v matici Al_2O_3 , která má rovnoměrnou jemnozrnnou strukturu. Hlavní úlohou SiC vláken je zabránit šíření mikrotrhlin v základní matici. Vlákná mají průměr jen $0,1 - 1 \mu m$, délku $5 - 100 \mu m$ a velmi vysokou pevnost. Jeho podíl v řezném materiálu je 30 %. Výsledek vyztužení je mimořádný. Viditelně se zvyšuje houževnatost, pevnost v tahu, odolnost proti tepelným šokům, tvrdost zatepla a odolnost proti opotřebení. Díky těmto výhodám se tato keramika používá pro obrábění žáruvzdorných slitin, kalených ocelí, šedých litin a zejména při přerušovaném řezu. [1] [7]

Neoxidická nitridová keramika je úplně jiný materiál. Vyznačuje se lepší odolností proti tepelným rázům a houževnatostí oproti oxidové keramiky. Tento řezný materiál v obrábění šedé litiny nemá konkurenci, neboť při velkém objemu odebíraného materiálu a vysokých řezných rychlostech klade vysoké nároky na řezný materiál. Osvědčuje se zejména při přerušovaném řezu a měnících se hloubkách řezu. [1]

2.2.4 Kubický nitrid boru

CBN patří mezi supertvrdé řezné materiály. Jeho tvrdost přesahuje již jen diamant. Charakterizuje ho jeho mimořádná tvrdost, dokonce i za extrémních teplot, velká odolnost proti abrazivnímu opotřebení a také dobrá chemická stabilita. I když je kubický nitrid boru houževnatější a tvrdší než keramika, nemá ale tak dobrou tepelnou a chemickou odolnost. Přes vysokou cenu tohoto řezného materiálu nachází uplatnění převážně v soustružení kalených součástí. Měl by se používat zásadně pro obrábění materiálu s tvrdostí min. 48 HRC. Pokud jsou obrobky moc měkké, dochází k velkému opotřebení břitu. Nízký podíl CBN v kombinaci s pojivem z keramiky umožňuje větší odolnost proti opotřebení a chemickou stabilitu, proto se hodí, takto vytvořený materiál, pro obrábění velmi tvrdých ocelových součástí. Naopak vysoký obsah CBN podporuje větší houževnatost a je vhodný pro obrábění tvrdých litin a žáruvzdorných slitin. [1]

2.2.5 Polykrystalický diamant

Nejtvrdším materiálem, který je znám, je přírodní monokrystalický diamant. Syntetická polykrystalický diamant (PKD) tuto tvrdost téměř dosahuje. Z toho důvodu umožňuje výborně odolávat abrazivnímu opotřebení. Jeho trvanlivost je mnohonásobně (může být i stonásobně) větší než u slinutých karbidů. Tento bezkonkurenční materiál má ale také své omezení:

- Teploty řezání nesmí překročit 600 °C;
- kvůli afinitě k železu není PKD použitelný pro obrábění železných materiálů;
- nehodí se pro obrábění houževnatých obrobků s vysokou pevností.



Obr. 2-10 Polykrystalický diamant

Tato omezení eliminují polykrystalický diamant jen na určité operace. Jako vynikající řezný materiál se projeví PKD při obrábění abrazivních neželezných a nekovových materiálů, kde je požadována vysoká jakost a přesnost obrobeného povrchu, jako jsou kompozitní materiály, umělé pryskyřice, pryže, plasty a uhlík. Dále také při obrábění kovů - měď, kluzné ložiskové materiály, bronz, mosaz, slitiny zinku a olova.

Kvůli velké křehkosti potřebuje PKD velmi stabilní podmínky, tuhé nástroje i stroje a vysoké řezné rychlosti. Lze je možné používat chladicí kapalinu. Využití nachází v jemném obrábění načisto při soustružení a vrtání. [1]

3 Definování klíčových příčin omezení při obrábění

Hlavním problémem při řešení této práce je vytrhávání materiálu na boku některých zubů pastorku z materiálu 18CrNiMo7-6 během odvalovacího frézování. Tato ocel se převážně používá pro vysoce namáhané cementované strojní součásti. Kvalita oceli výrazně závisí na dodavateli – zpracovateli oceli. Přestože pro všechny dodavatele platí stejné dodací podmínky, jsou zjištěny výrazné rozdíly v metalografické kvalitě. Pro minimalizaci deformací je zapotřebí zajistit homogenní strukturu s jemnou zrnitostí a vysokou čistotou. [11] Podrobné informace o tomto materiálu jsou v příloze P1.

Na zub, jakožto na základní část ozubeného kola, jsou kladeny vysoké nároky. Ozubená kola soustřeďují silový tok do malého prostoru kontaktu zubů, proto jsou kladeny požadavky hlavně na kvalitu, přesnost a únosnost zubů.

Zadavatel práce se potýká s omezeními právě z důvodů obrobitelnosti při frézování ozubení. Mezi tyto limitující parametry patří například:

- vytrhaný povrch ozubení z materiálů, které se v minulosti obráběly bez problémů;
- neschopnost nasazení doporučených řezných podmínek staršího nářadí na novém stroji.

Právě tato omezení mají za následek snížení očekávané produktivity a přinášejí sebou nežádoucí vícenásledky.

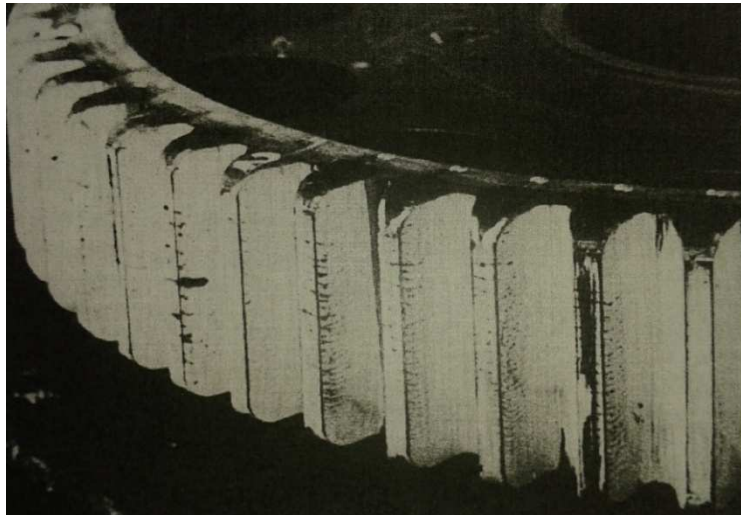
Jak už bylo popsáno výše, hlavním problémem je výskyt trhlin a prasklin vzniklých při tepelném zpracování vlivem potřhaného povrchu zubů. Tato poškození v součástech může být důsledkem jedné z mnoha příčin, jako je hrubé broušení, nesprávné tepelné zpracování, přílišné namáhání nebo vadný materiál. [12] Ačkoliv základním předpokladem pro předcházení vzniku trhlin je správná volba a dodržování technologického postupu, mohou být jejich důvodem i chyby zděděné z předcházejících etap výroby (záměna materiálu, skryté a strukturní vady, konstrukční nedostatky apod.)

Praskliny po kalení

Jedná se o praskliny způsobené mimořádně vysokým vnitřním pnutím vznikajícím při tepelném zpracování. Obvykle, nikoliv však vždy jsou důsledkem prudkého ochlazení.

Částečně povrchově kalené boky zubů plamenem nebo procesem indukčního kalení jsou k tomuto druhu poškození náchylnější než úplně zakalené povrchy zubů nebo prokalené zuby.

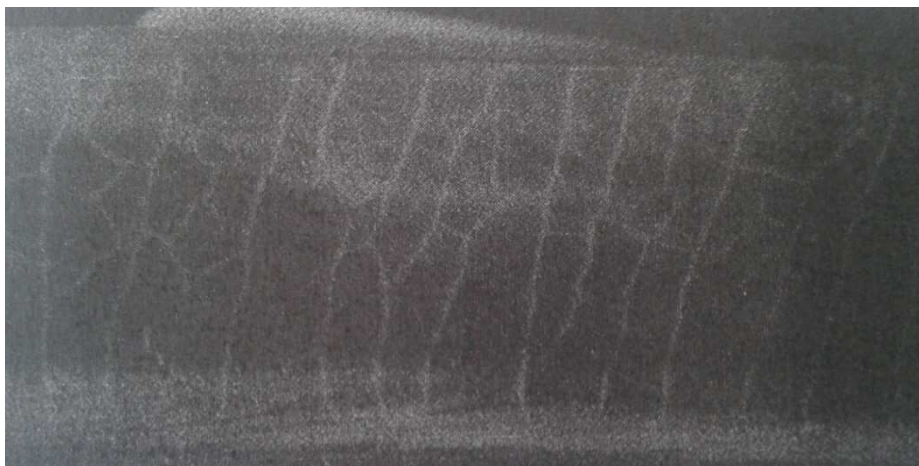
K zviditelnění některých prasklin vzniklých prudkým podchlazením dojde až po uplynutí určité doby nebo při následném broušení. Nejčastěji se objevují na boku hlav zubů ozubeného kola (Obr. 3-1). [12]



Obr. 3-1 Praskliny po kalení [12]

Praskliny v důsledku broušení

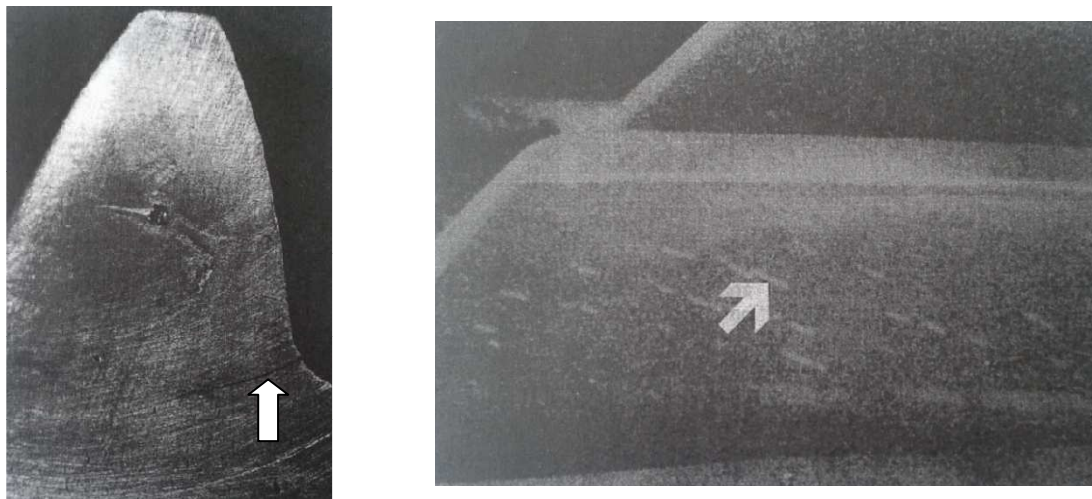
Tyto povrchové praskliny, které mají obvykle pravidelný vzor, se vyskytují v průběhu broušení nebo po něm. Praskliny jsou krátké nepříliš hluboké a mají vzhled řady nerovných rovnoběžných trhlin, zpravidla kolmých ke směru pohybu brousícího kotouče nebo vlasový vzhled (Obr. 3-2). Mohou se objevit v souvislosti se spálením při broušení a zviditelnit pomocí nitálového lepu. [12]



Obr. 3-2 Praskliny v důsledku broušení [12]

Únavové praskliny

Praskliny, které se šíří pod vlivem střídavého nebo cyklického napětí, které může být značně blízké mezi pevnosti materiálu v tahu. Někdy se praskliny vzniklé přetížením povrchu šíří jako praskliny únavové. Na obrázku vlevo (Obr. 3-3) je znázorněna únavová prasklina, které se objevila v zaoblení paty zatěžovaného boku zubu kola. Obrázek vpravo ukazuje povrchové praskliny, vytvořené podél čar dotyku na bocích zubu nitridovaného pastorku. [12]



Obr. 3-3 Únavové praskliny [12]

V následující tabulce jsou naměřené hodnoty drsností pastorků během výroby ve Wikov Gear. Drsnost byla měřena po odvalovacím frézování na třech zubech každého výrobku. Bylo očekáváno, že se mechanické zpracování během vykovávání projeví více.

Sériové číslo	Drsnost Ra			Průměr	
18825	0,95	0,44	0,41	0,60	0,43
18826	0,35	0,39	0,34	0,36	
18827	0,36	0,25	0,34	0,32	
19214	0,28	0,35	0,41	0,35	0,36
19215	0,54	0,23	0,51	0,43	
19216	0,33	0,18	0,4	0,30	
19630	0,26	0,38	0,43	0,36	0,45
19631	0,44	0,27	0,51	0,41	
19632	0,32	0,43	0,98	0,58	

Tab. 3-1 Drsnost jednotlivých skupin materiálu

Po obrobení jednotlivých skupin materiálu je rozdíl ve výsledné drsnosti nevýrazný, přesto je však možné vidět patrné rozdíly. Ideálním stavem je dosažení co nejlepší drsnosti, jako daná technologie obrábění dovoluje, neboť při vyšší drsnosti boku zubů je větší riziko vzniku trhlin při tepelném zpracování.

Sériové číslo	Název kovárny	Tvrдость HB
18825	Kovárna II	242
18826		242
18827		242
19214	Kovárna III	167
19215		160
19216		171
19630	Kovárna I	242
19631		248
19632		255

Tab. 3-2 Tvrдость jednotlivých materiálů

V tabulce Tab. 3-2 jsou vypsané hodnoty tvrdostí jednotlivých materiálů. Jsou získané z dokumentace, které poskytly kovárny spolu s dodávkou polotovarů. Hodnoty, které jsou v tabulce u Kovárny III, nejsou konečné. Materiál se nechával přešlechtit a poté tvrdost dosáhla hodnoty cca 240 HB.

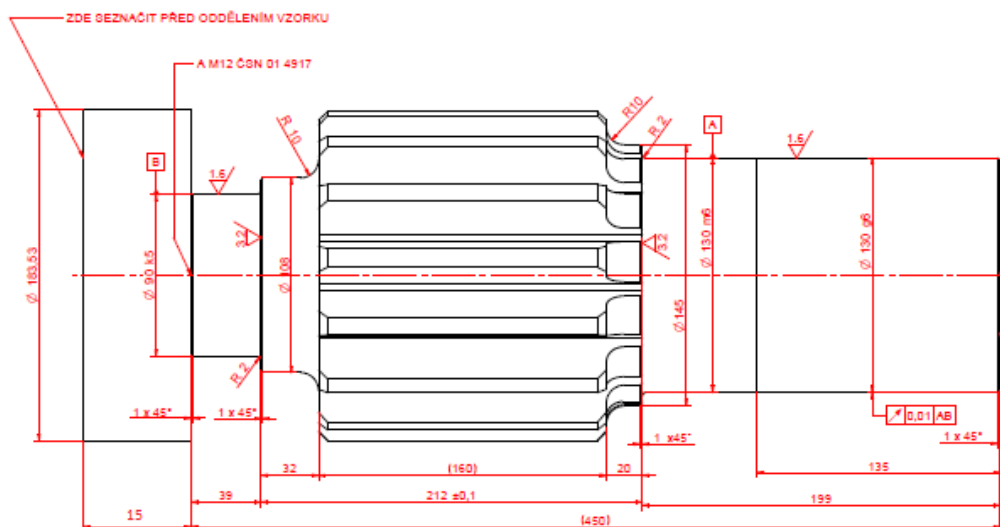
4 Návrh, realizace a vyhodnocení experimentu

4.1 Úvod k experimentálnímu studiu

Experimenty jsou prováděné pro potřebu řešení této diplomové práce, které povedou ke zjištění důležitých hodnot a informací a pomohou tak ke správnému zpracování této práce. Experimenty budou realizovány v halové laboratoři katedry KTO za laboratorních podmínek.

Podstatou projektu je nalezení kořenových příčin, které mají právě za následek zmiňované problémy. Úkolem je analyzovat všechny vstupní podmínky a na základě této analýzy určit příčinu limitujících omezení a zároveň stanovit taková opatření, která povedou k odstranění nebo alespoň zmírnění těchto příčin.

Pro celý projekt byl objednána conti-slítek v podobě tyče, který byl následně rozřezán na 3 x 3 kusy. Sestavy 3 kusů polotovarů o stejném chemickém složení byly odeslány do třech kováren ke zpracování (k překováním tvaru dle udání technologa). Po návratu z kováren se přídavky pro experimenty z levého čela výkovku uřízly a byly poskytnuty k testování.



Obr. 4-1 Nárys pastorku s přídavkem pro experiment

Hlavní myšlenkou tohoto úkolu bylo co nejvíce se přiblížit podmínkám při provádění experimentu na katedře KTO s výrobou ostrých dílů ve firmě Wikov Gear s.r.o. Zvolit podobnou technologii obrábění, použít stejný nástroj a řezné prostředí. Při plánování nastaly nečekané komplikace, a proto bylo nutné přistoupit k několika změnám. Původní plán byl takový, že se na experiment použije kotoučová fréza daných rozměrů a ze stejného materiálu

jako je nástroj ve Wikov Gear. Bohužel dodávka nástroje nebyla splněna v daném termínu, a proto se muselo přistoupit k náhradnímu řešení. Byl vybrán jiný druh nástroje z materiálu, který má velmi podobné vlastnosti jako používaný nástroj ve Wikov Gear. Z důvodu použití jiného typu nástroje, musela být změněna i technologie obrábění.

Výkovky budou ve Wikov Gear dále pokračovat ve výrobě a vzniknou z nich běžné ostré díly, které budou použity pro zákazníka.



Obr. 4-2 Dodané polotovary (4ks z devíti)



Obr. 4-3 Frézování pastorku ve firmě Wikov Gear

4.2 Technická charakteristika experimentálního zařízení

4.2.1 Obráběcí stroj

Stroj, na kterém se experiment prováděl, je vertikální obráběcí centrum MCV 750 A. Výrobce stroje je KOVOSVIT Sezimovo Ústí. Stroj se nachází v halové laboratoři na ZČU. Na tomto stroji je možné provádět frézovací, vrtací a vyvrtávací operace. Podrobné informace o stroji jsou uvedené v příloze P2.



Obr. 4-4 Charakteristika stroje [13]

4.2.2 Nástroj

Pro experiment byla zvolena čtyřbřitá čelní válcová dokončovací fréza o průměru 10 mm z materiálu Vanadis 30 (Obr. 4-5). Nástroj byl napovlakován vrstvou TiN. Úhel šroubovice = 30° a úhel čela = 12° . Tento nástroj je vhodný pro obrábění různých materiálů do pevnosti 900 MPa. Rozměrové parametry uvádí tabulka Tab. 4-1. [14]

Rozměrový parametr	D	d	l	L	Z
Hodnota	10	10	45	95	4

Tab. 4-1 Rozměrové parametry frézy



Obr. 4-5 Čelní válcová fréza

4.2.3 Obrobek

Obrobek, na kterém je řešena tato problematika, je pastorek délky 450 mm. Zuby na jeho čelním vnějším ozubení jsou přímé. Hlavová kružnice má průměr 183,530 mm, roztečná 153,73 mm a patní kružnice má rozměr průměru 137,003 mm. Modul tohoto výrobku je 10,25. Vyroben je ze středně legované ušlechtilé chrom-nikl-molybdenové oceli k cementování 18CrNiMo7-6. Tento materiál je vhodný pro velmi namáhané strojní součásti s cementovaným povrchem. Tvrdost povrchu této vrstvy je po tepelném zpracování 62 až 64 HRC, zatímco jádro cementované součásti i přes relativně vysokou pevnost je značně houževnaté. [15] Bližší specifikace je uvedena v příloze P3.

Pro experiment na ZČU na katedře obrábění byl použit vzorek ve tvaru kotouče o šířce 15 mm.



Obr. 4-6 Vzorky pro experiment

4.3 Vstupní experimenty

4.3.1 Stanovení řezných podmínek dle krátkodobé zkoušky

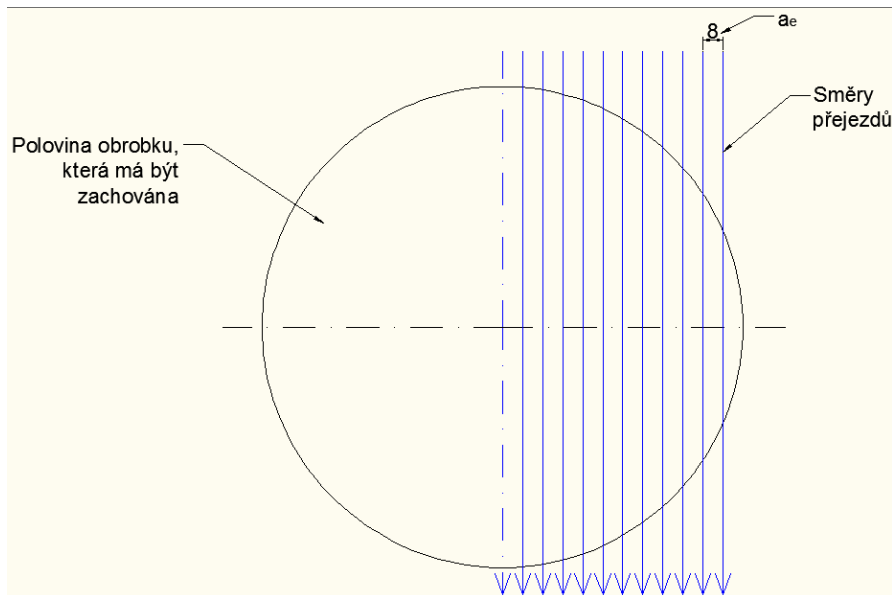
- zpracováno pomocí [8] [11]

Důležitým úkolem při tomto experimentu bylo zjistit řezné podmínky, při kterých bude samotné obrábění prováděno. První návrh byl provést krátkodobou zkoušku trvanlivosti dle A. S. Kondratova. Tato zkouška spočívá v měření intenzity opotřebení břitu při různých řezných rychlostech. Princip zkoušky je založený na tom, že intenzita opotřebení břitu je úměrná řezné rychlosti, to znamená, že s narůstající řeznou rychlostí se zvyšuje i intenzita opotřebení břitu.

Danou frézou se frézovalo do zkušebního vzorku určitou řeznou rychlostí s konstantním posuvem po vhodně zvolený časový úsek. Pro následující časový úsek se vždy zvýšila řezná

rychlost, posuv zůstal stále konstantní jako při první řezné rychlosti. Pro každý časový úsek se změřil přírůstek opotřebení na hřbetě delta VB.

Zkouška byla omezená objemem odfrézovaného materiálu (pouze do poloviny kotouče) a kritériálním opotřebením pro všechny experimenty $VB_B = 0,015 \text{ mm}$.



Obr. 4-7 Princip obrábění

Konkrétní podmínky pro krátkodobou zkoušku trvanlivosti dle A. S. Kondratova byly následující:

Posuv na zub f_z [mm]	Šířka řezu a_e [mm]	Hloubka řezu a_p [mm]	$VB_{Bkrit} = 0,015\text{mm}$	
0,04	8	15		
Řezná rychlost [m/min]		Přírůstek času řezání ΔT [min]	Přírůstek opotřebení ΔVB_B [μm]	Intenzita opotřebení I [$\mu\text{m}/\text{min}$]
v_{c1}	50	2,95	34	11,53
v_{c2}	65	3,53	27	7,64
v_{c3}	75	1,98	5	2,52

Tab. 4-2 Vypočtené hodnoty

$$I = \frac{\Delta VB}{\Delta T} \Rightarrow I_1 = \frac{34}{2,95} = 11,53$$

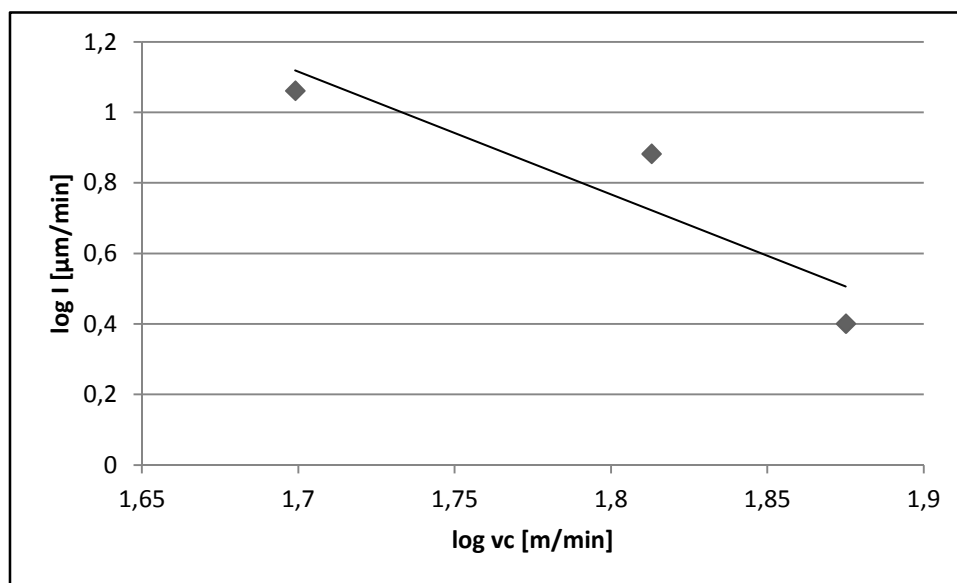
$$I_2 = \frac{27}{3,53} = 7,64$$

$$I_3 = \frac{5}{1,98} = 2,52$$

$$I_{ekv} = \frac{\Sigma \Delta VB_B}{\Sigma \Delta T} = \frac{66}{8,46} = 7,80$$

$$v_{ekv} = \frac{c_{vT}}{\Sigma \Delta T^{\frac{1}{m}}} \Rightarrow c_{vT} = v_{ekv} \cdot (\Sigma \Delta T)^{\frac{1}{m}}$$

$$v_c = \frac{c_{vT}}{T^{\frac{1}{m}}}$$



Graf 4-1 Závislost intenzity opotřebení na řezné rychlosti

Při rychlosti v_{c1} zrostlo opotřebení VB_B o 0,034 mm za čas $t = 2,95$ min a při druhé rychlosti v_{c2} narostlo opotřebení VB_B o 0,027 mm za čas $t = 3,53$ min. Poté, co byla použita nejvyšší řezná rychlost v_{c3} , hodnoty opotřebení na hřbetě po čtvrtém přejezdu začaly klesat. Příčinou byla vysoká teplota v místě řezu v kombinaci s vysokým tlakem, která měla za následek vznik plastické deformace. Z tohoto důvodu a nedostatečného množství materiálu byla krátkodobá zkušební trvanlivosti dle A. S. Kondratova vyloučena.

4.3.2 Stanovení řezných podmínek dle dlouhodobé zkoušky

Pozorováním krátkodobé zkoušky trvanlivosti a sledováním určitých závislostí vedlo ke zvolení řezné rychlosti $v_c = 55$ m/min a zvýšení posuvu na zub na $f_z = 0,08$ mm. Opotřebení, při těchto podmínkách, narůstalo rovnoměrně a nedocházelo k plastické deformaci. Bohužel se vyskytly jiné komplikace. Na obrobku ve stejných místech a ve stejné výšce se začal objevovat pruh. Příčinou tohoto pruhu bylo špatné upnutí obrobku, které vedlo ke vzniku vibrací. Tudíž zde docházelo ke zvyšování teploty a lepení materiálu. Vlivem lepení materiálu došlo k zahlcení drážky a poškození celého nástroje.



Obr. 4-8 Nedostatečné upnutí obrobku



Obr. 4-9 Zlomená fréza

Muselo být dořešeno správné upnutí, kdy upínací síla byla vždycky stanovena upínáním pomocí momentového klíče.

4.4 Realizace experimentu

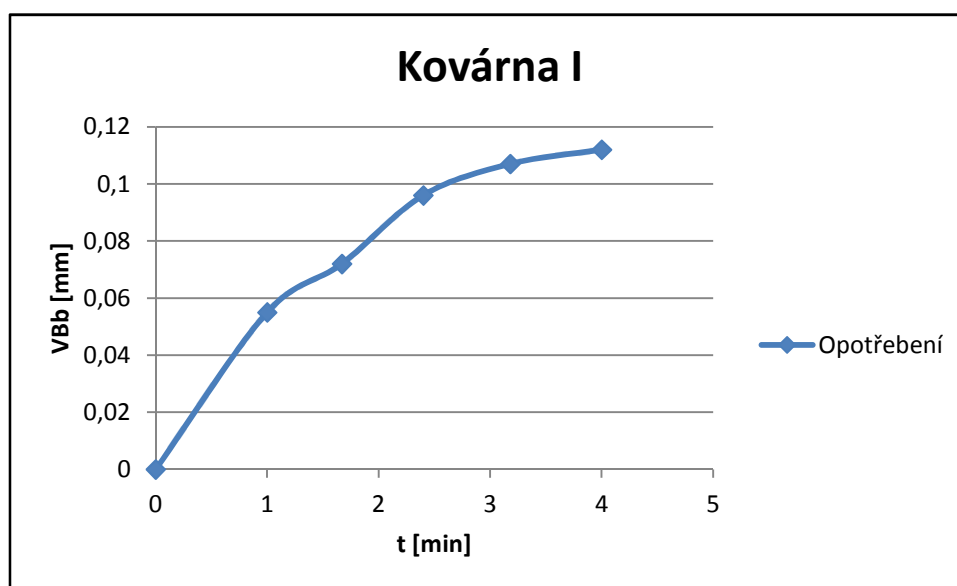
Z návrhů, které byly popsány v předchozí kapitole, vyplynuly řezné podmínky, při kterých se bude provádět samotný experiment. Dále bylo zapotřebí k experimentu používat tří-složkový dynamometr a optický mikroskop. Podrobnější charakteristika je uvedena v příloze P4 a P5.

- Řezná rychlost $v_c = 55$ m/min;
- posuv na zub $f_z = 0,08$ mm;
- špička nástroje - 1 mm pod obrobkem;
- otáčky $n = 1752$ ot/min;
- řezná kapalina – voda.

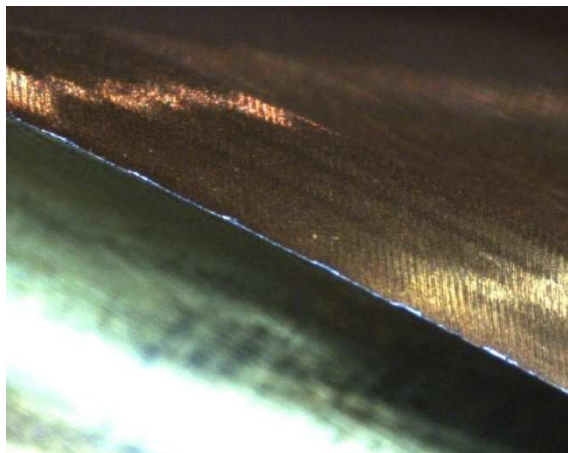
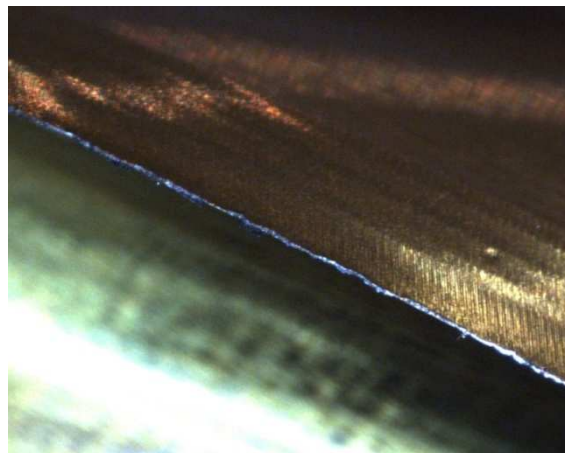
Pro rychlé orientování se a zjednodušení označení naměřených hodnot bylo zavedeno následující značení:

Číslo nástroje	Materiál	Číslo bříty	Čas [min]	Hodnota [mm]
4	A0	1	0	0

4.4.1 Experiment - Kovárna I

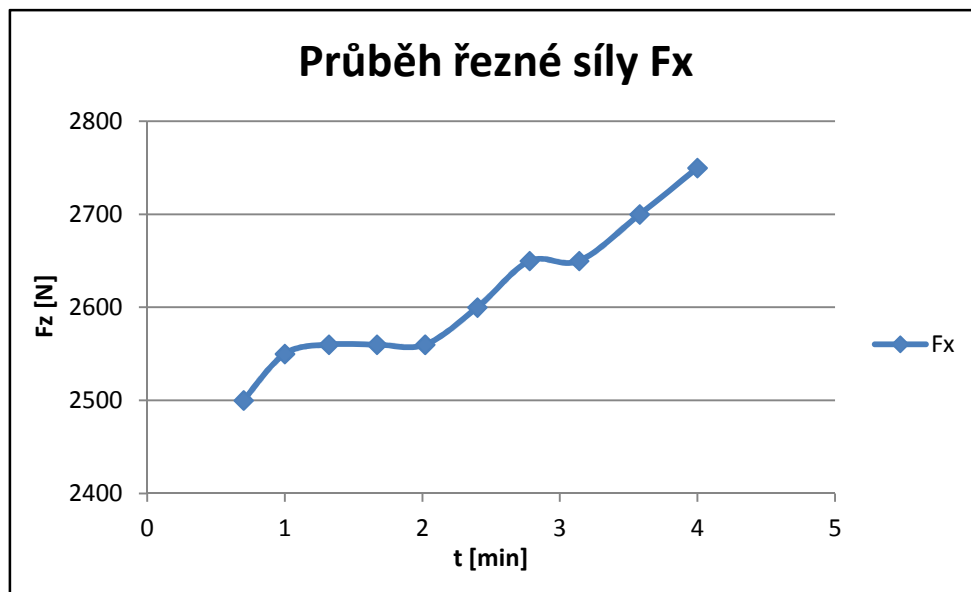


Graf 4-2 Průběh opotřebení v závislosti na čase

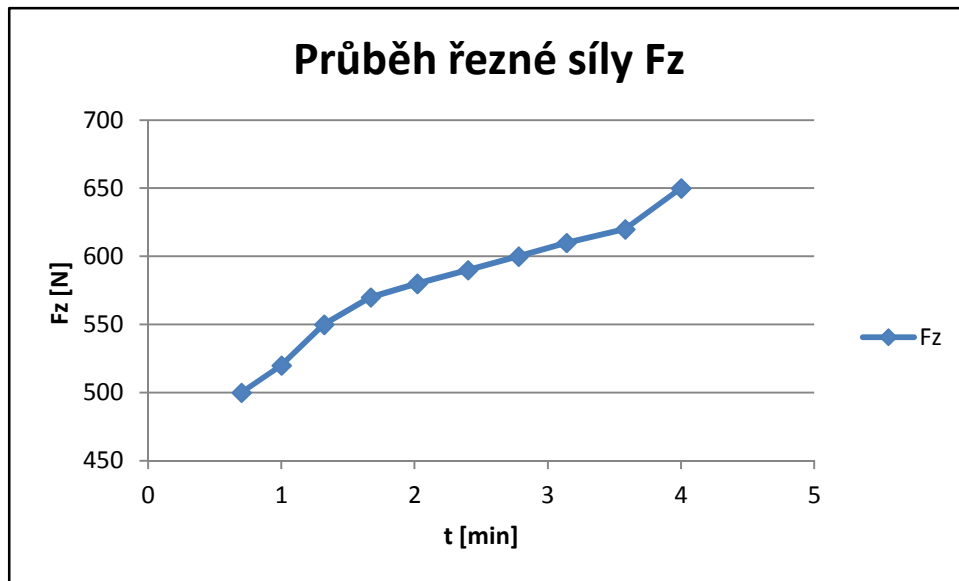
Obr. 4-10 Označení: 4-A0-1-1-0,055¹

Obr. 4-11 Označení: 4-A0-1-3,18-0,107

Z grafu a obrázku výše je patrné, že opotřebení břitu velmi rychle narůstá s časem. Po čtyřech minutách bylo naměřeno nejvyšší opotřebení ze všech polotovarů a to $VB_B = 0,112$ mm.

Graf 4-3 Průběh řezné síly F_x v závislosti na čase

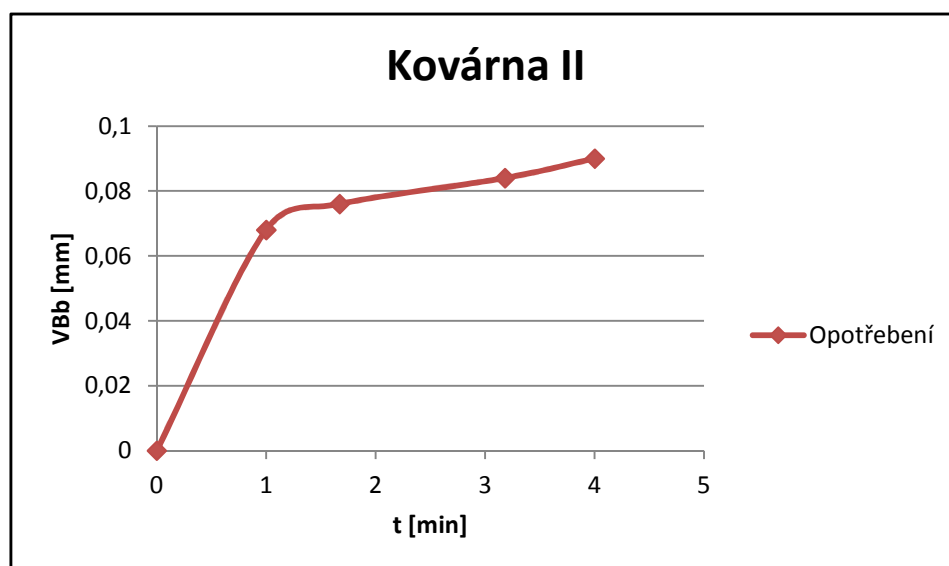
¹ Pozn. Označení A0 zde představuje vzorek 19630



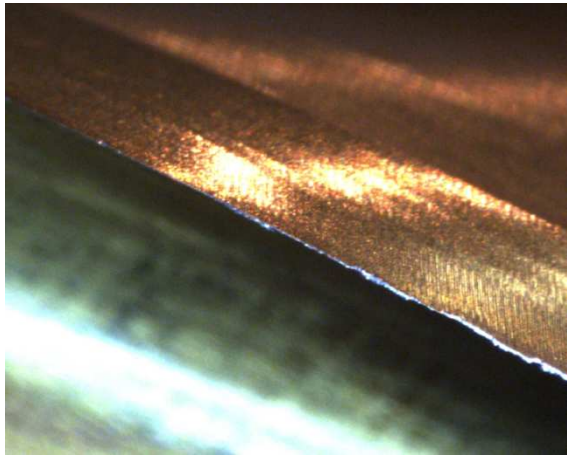
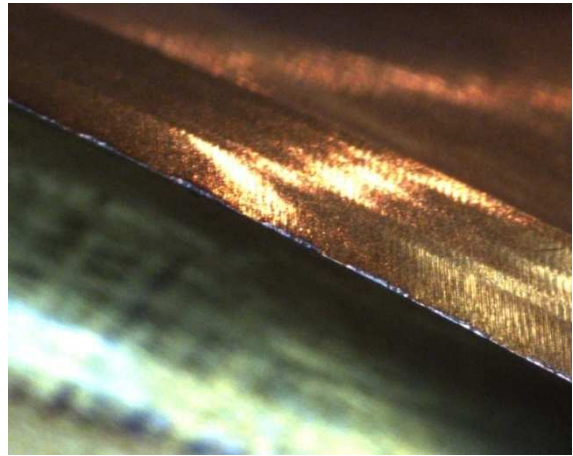
Graf 4-4 Průběh řezné síly Fz v závislosti na čase

S narůstajícím opotřebením se zvyšují i řezné síly. Na grafech výše je vyobrazena řezná síla ve směru x F_x , která překonává řezný odpor proti posuvu. Dále řezná síla ve směru z F_z , která překonává řezný odpor proti hlavnímu pohybu. To samé platí i pro průběhy řezných sil u zbývajících vzorků. Průběhy jednotlivých složek řezných sil se mění dle závislosti na opotřebení bříty. U tohoto vzorku byl vzrůst opotřebení rychlý a plynulý, což je patrné i na průběhu řezných sil, který je též rovnoměrný.

4.4.2 Experiment - Kovárna II

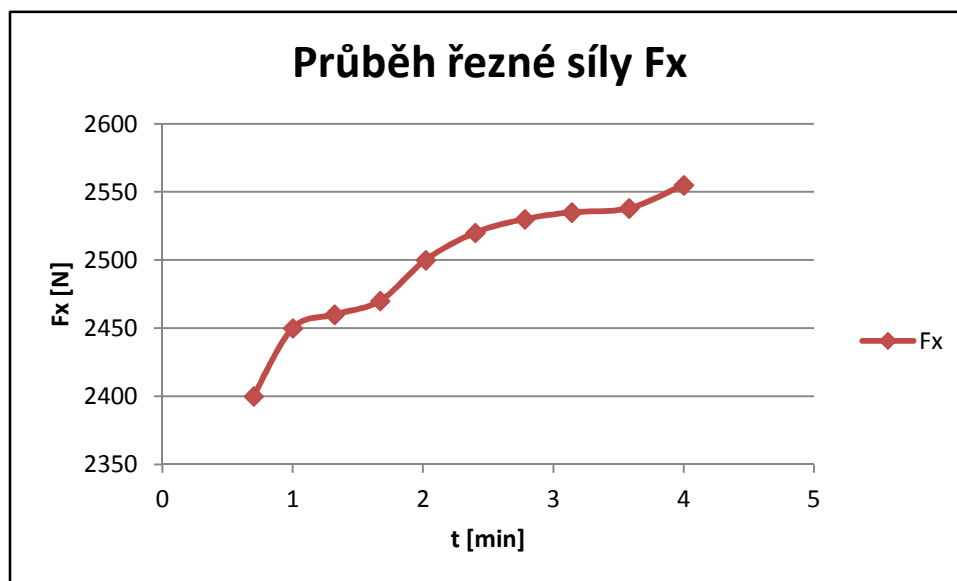


Graf 4-5 Průběh opotřebení v závislosti na čase

Obr. 4-12 Označení: 5-B0-1-1-0,068²

Obr. 4-13 Označení: 5-B0-1-3,18-0,084

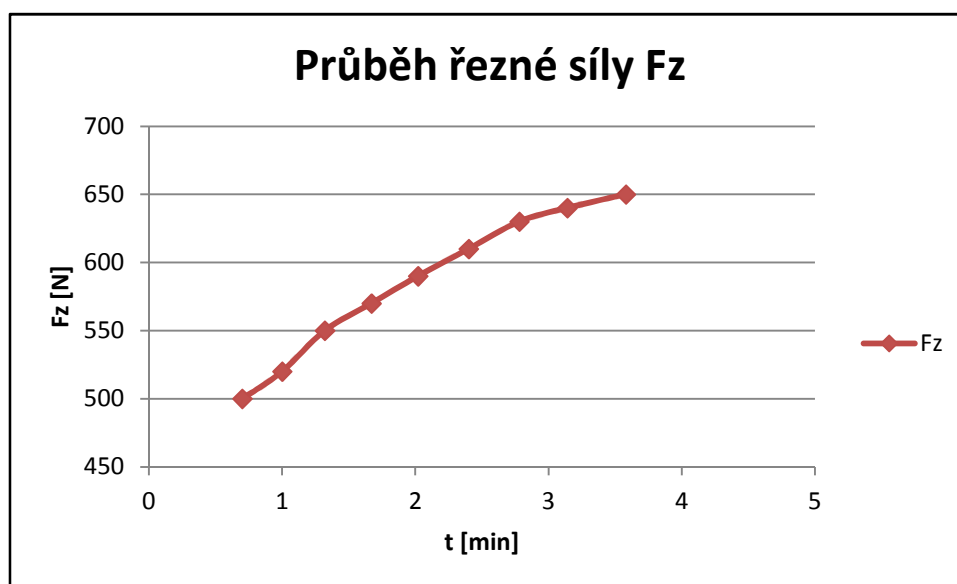
Z grafu Graf 4-5 je patrné, že při obrábění tohoto vzorku do první minuty opotřebení břitu výrazně narůstalo a po zbytek času byl vzrůst opotřebení nepatrný.



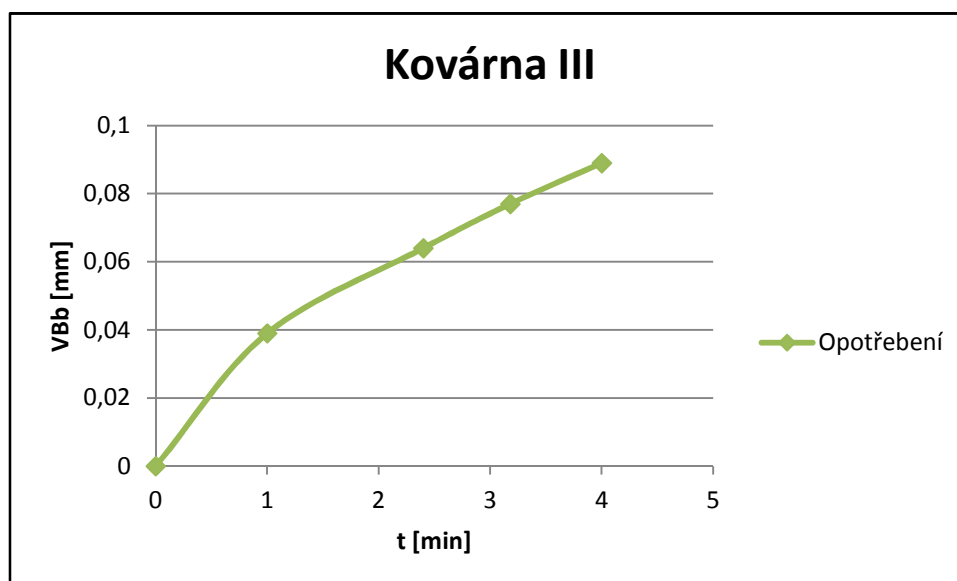
Graf 4-6 Průběh řezné síly Fx v závislosti na čase

Na grafu Graf 4-6 lze vidět patrný vzrůst síly Fx v první minutě. Obecně platí, že čím vyšší je opotřebení, tím narůstají i řezné síly. U tohoto vzorku, jak už bylo zmíněno výše, narůstalo opotřebení břitu, v první minutě, velmi rychle. Což se i projevilo v průběhu řezné síly Fx.

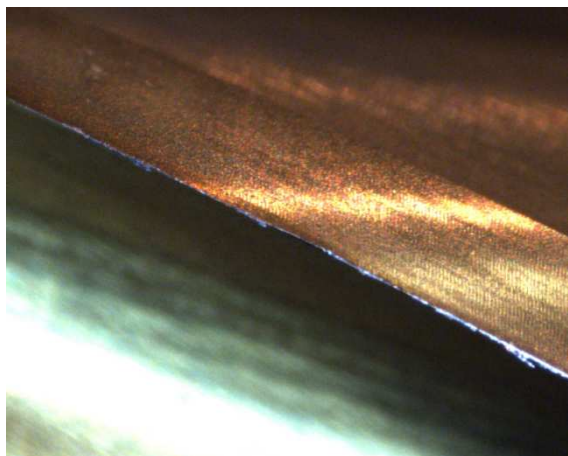
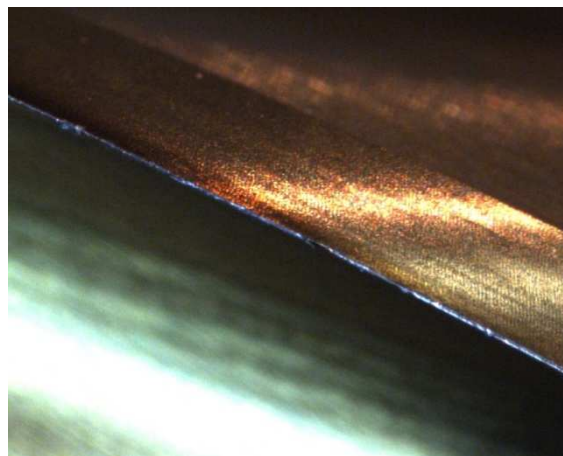
² Pozn. Označení B0 zde představuje vzorek 18825

Graf 4-7 Průběh řezné síly F_x v závislosti na čase

4.4.3 Experiment - Kovárna III

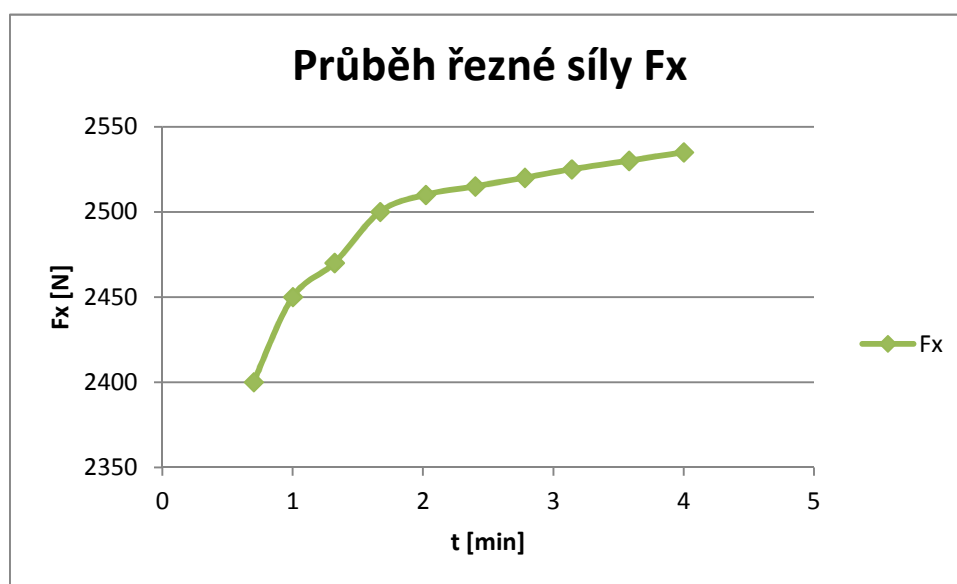


Graf 4-8 Průběh opotřebení v závislosti na čase

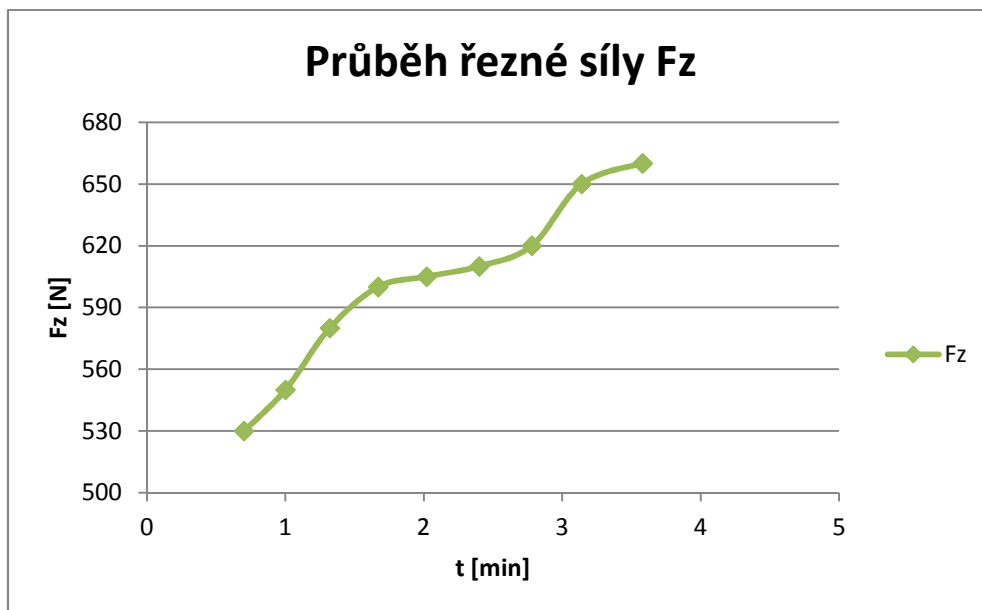
Obr. 4-14 Označení: 6-C2-1-1-0,039³

Obr. 4-15 Označení: 6-C2-1-3,18-0,077

Ze všech polotovarů má tento vzorek nejrovnoměrňší nárůst opotřebení s časem a také nejnižší hodnoty. Velikost opotřebení po čtyřech minutách dosáhla hodnoty $VB_B = 0,089$ mm.

Graf 4-9 Průběh řezné síly F_x v závislosti na čase

³ Pozn. Označení C2 zde představuje vzorek 19216



Graf 4-10 Průběh řezné síly Fz v závislosti na čase

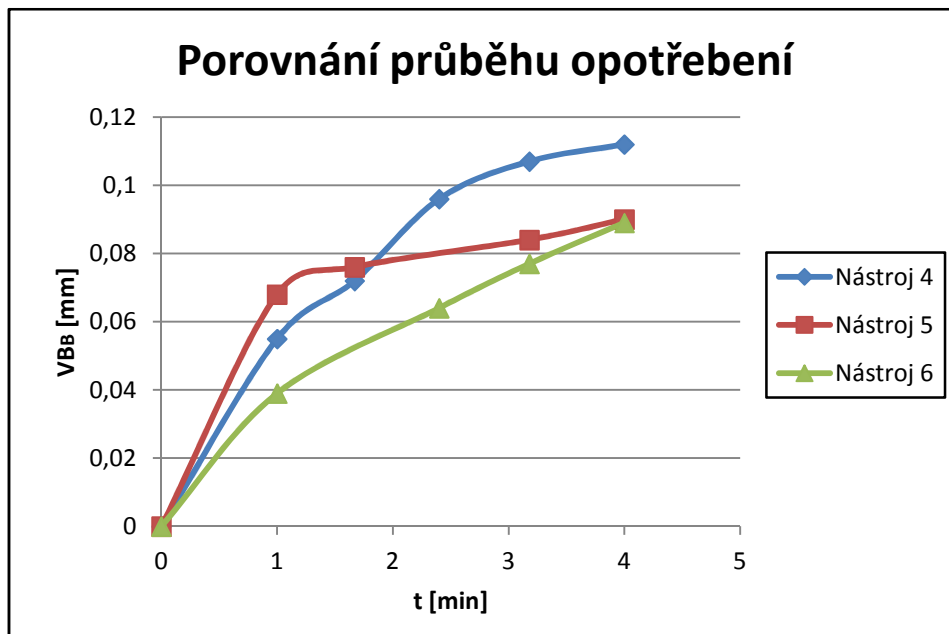
Opět je z grafů patrné, že nárůst opotřebení břitu nástroje je v korelaci s nárůstem řezných sil.

4.5 Sumarizace výsledků

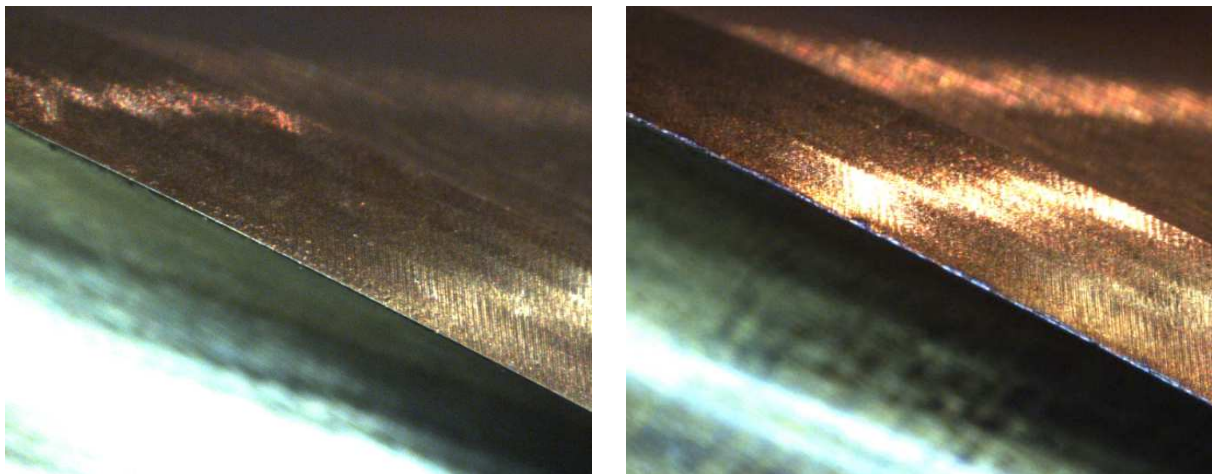
4.5.1 Vyhodnocení opotřebení břitu nástroje

Nárůst opotřebení byl měřen na optickém mikroskopu Multicheck PC500 s použitím objektivu OP1-B75, který disponuje zvětšením až 75-krát. Měření probíhalo po čtvrtém, šestém, osmém, desátém a posledním dvanáctém přejezdu. Nástroj byl po vyjmutí ze stroje upnut přímo na mikroskopu. Poté bylo změřeno opotřebení na hřbetě nástroje z válcové strany.

Z hlediska opotřebení vyšel nejlépe nástroj 6, neboť jeho růst opotřebení má plynulý a rovnoměrný charakter. Nástroj 5, který má v první minutě rychlý nárůst opotřebení, má konečnou hodnotu po čtyřech minutách shodnou s nástrojem 6 a to $VB_B = 0,090$ mm. Nejhůře při experimentu dopadl nástroj 4, s kterým se obráběl vzorek s nejvyšší tvrdostí. Už po druhé minutě, má vyšší opotřebení než zbývající nástroje. Tato fréza dosáhla po obrábění hodnoty opotřebení $VB_B = 0,112$ mm.



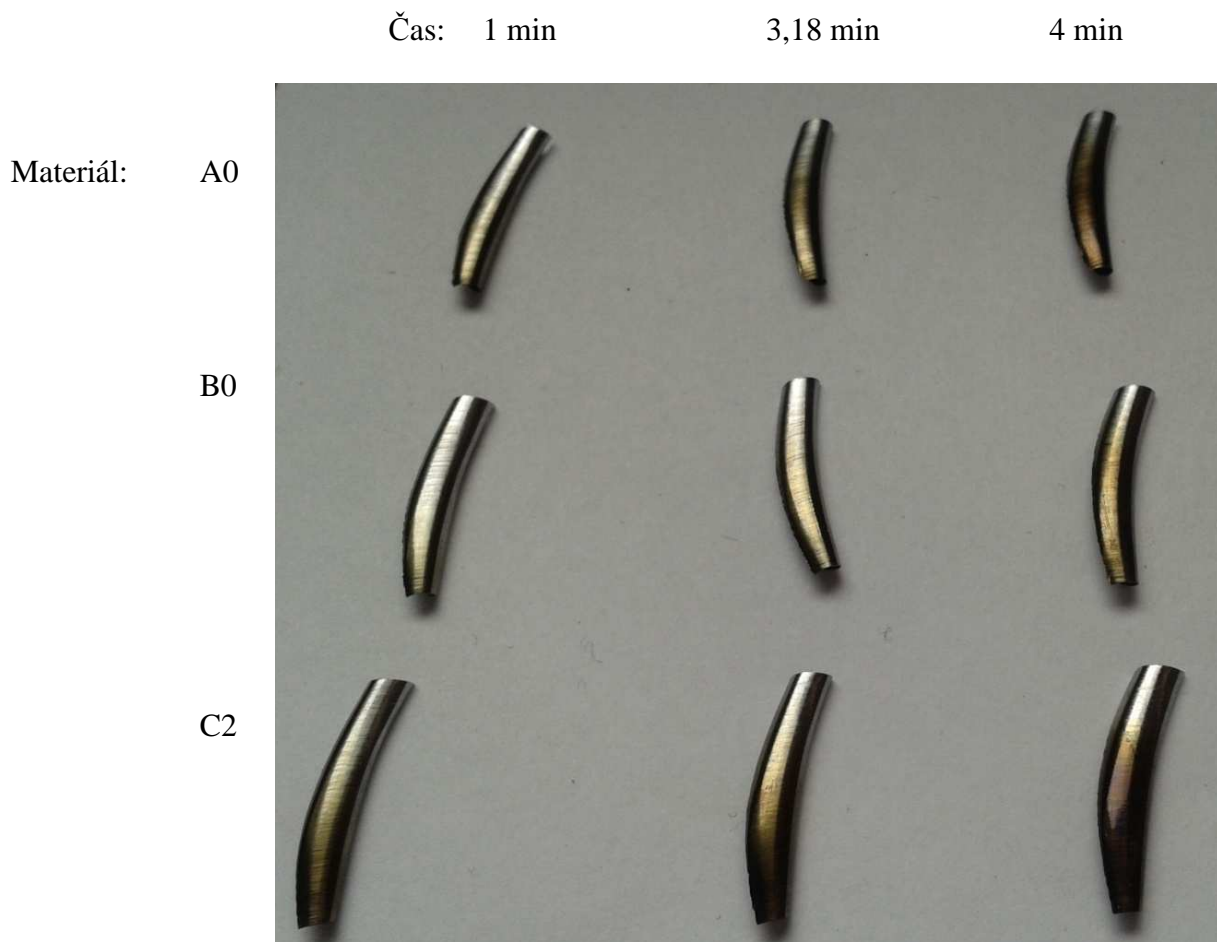
Graf 4-11 Porovnání průběhu opotřebení



Obr. 4-16 Opotřebení nového nástroje (vlevo) a nástroje po 12. přejezdu

4.5.2 Vyhodnocení vzniklých třísek

Po každém přejezdu, kdy docházelo k měření opotřebení břitu nástroje, byly odebrány třísky z prostoru stroje. Jednotlivé třísky se nafotily dle časových úseků a druhů polotovarů pro následné a detailnější vyhodnocování.



Obr. 4-17 Třísky jednotlivých materiálů

Během frézování všech typů polotovaru vznikal stejný typ třísky. Konkrétně se jedná o obloučkovité dělené třísky, které je možné zařadit do normy ISO 6.2. Třísky se lišily pouze zabarvením, kdy s přibývajícím časem bylo zabarvení tmavší a téměř po celé délce třísky. Příčinou těchto viditelných tmavých oblastí bylo teplotní zatížení v místě řezu.

Třísky z materiálu A0 a B0 mají po 1. minutě nepatrný pás zabarvení, kdežto pás na tříse z materiálu C2 sahá až do jedné třetiny. Obdobné je to i v dalších časech, kdy nejtmaší zabarvení a největší část tmavého pásu nacházíme u materiálu C2.

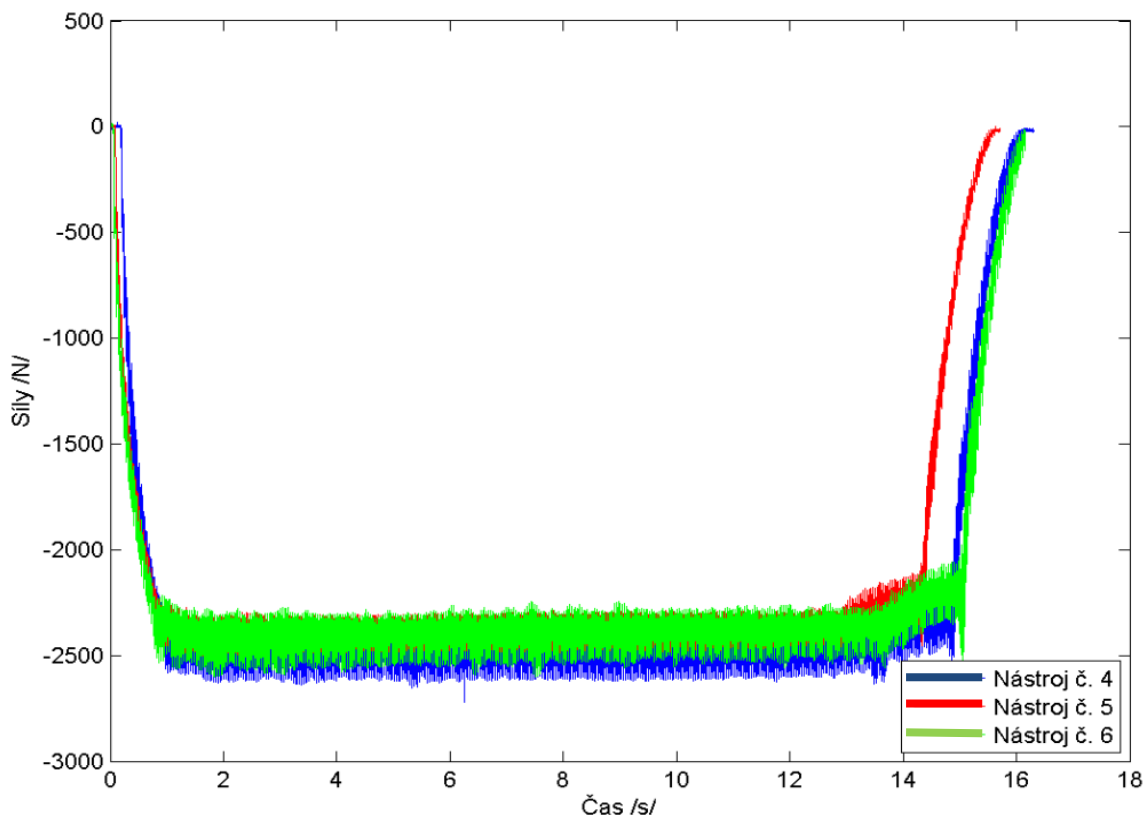
4.5.3 Vyhodnocení řezných sil

Pro měření řezných sil se používal tří-složkový dynamometr KISTLER 9225A, který snímá tři vzájemně kolmé síly pomocí piezoelektrických krystalů křemene. Tento dynamometr využívá tzv. piezoelektrický jev, při kterém dochází ke vzniku náboje na povrchu krystalu. Při zatěžování je velikost náboje přímo úměrná velikosti působící síly a s

poklesem zatížení se lineárně snižuje. Vzniklý náboj je velmi malý, proto je zapotřebí použít zesilovač, který má za úkol přeměnit malý elektrický náboj přiváděný speciálním kabelem od dynamometru na měřitelné napětí [V]. [16] Vyhodnocení řezných sil při frézování probíhalo pomocí softwaru LABVIEW 8.2.

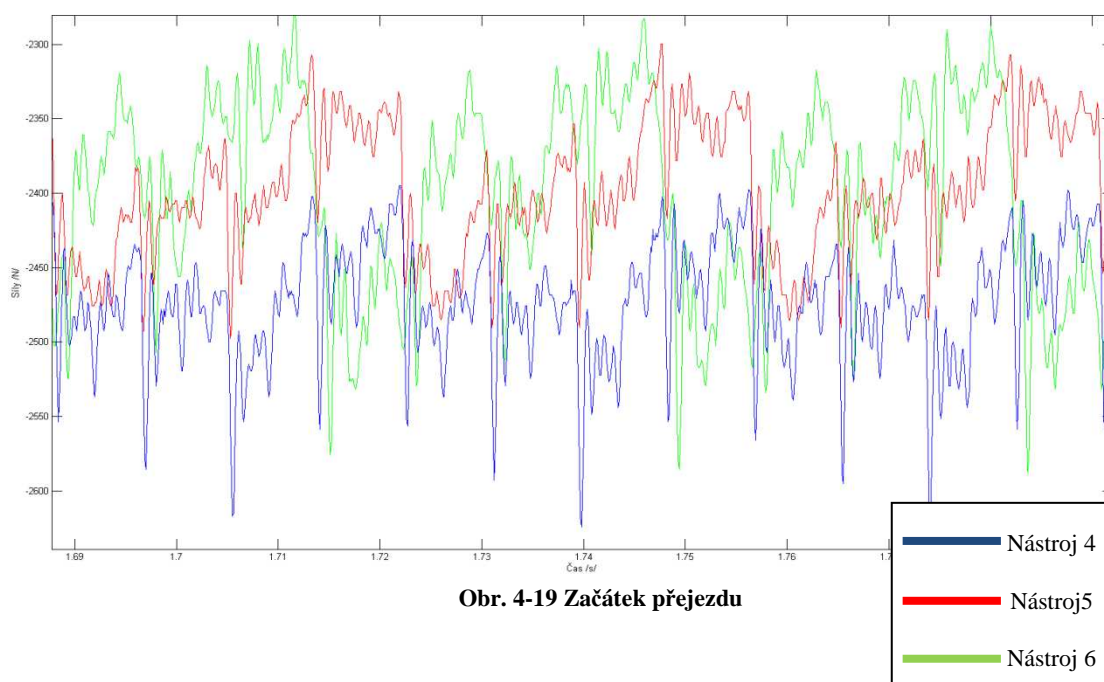
Hodnocení nástroje na začátku obrábění

Naměřená data řezné síly F_x pro všechny tři nástroje se načetla do jednoho grafu. Pro detailnější zkoumání byly vygenerovány tři úseky. A to, jak se chovala řezná síla F_x na začátku, na středu a na konci tohoto přejezdu.

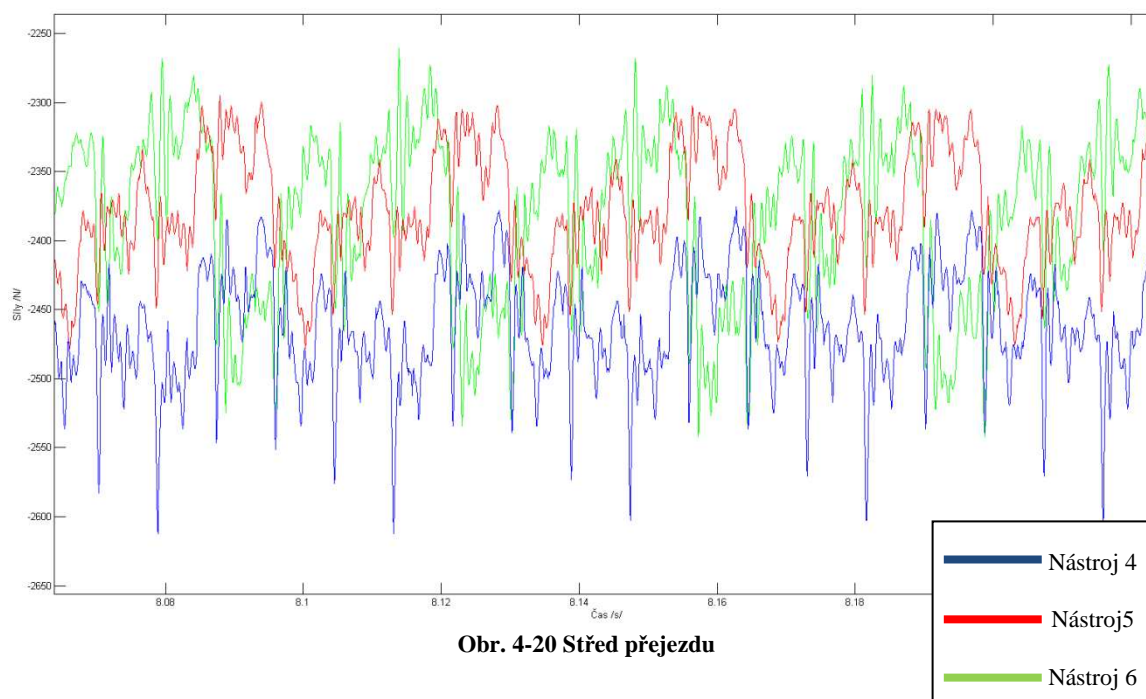


Obr. 4-18 Porovnání průběhu řezné síly F_x u čtvrtého přejezdu

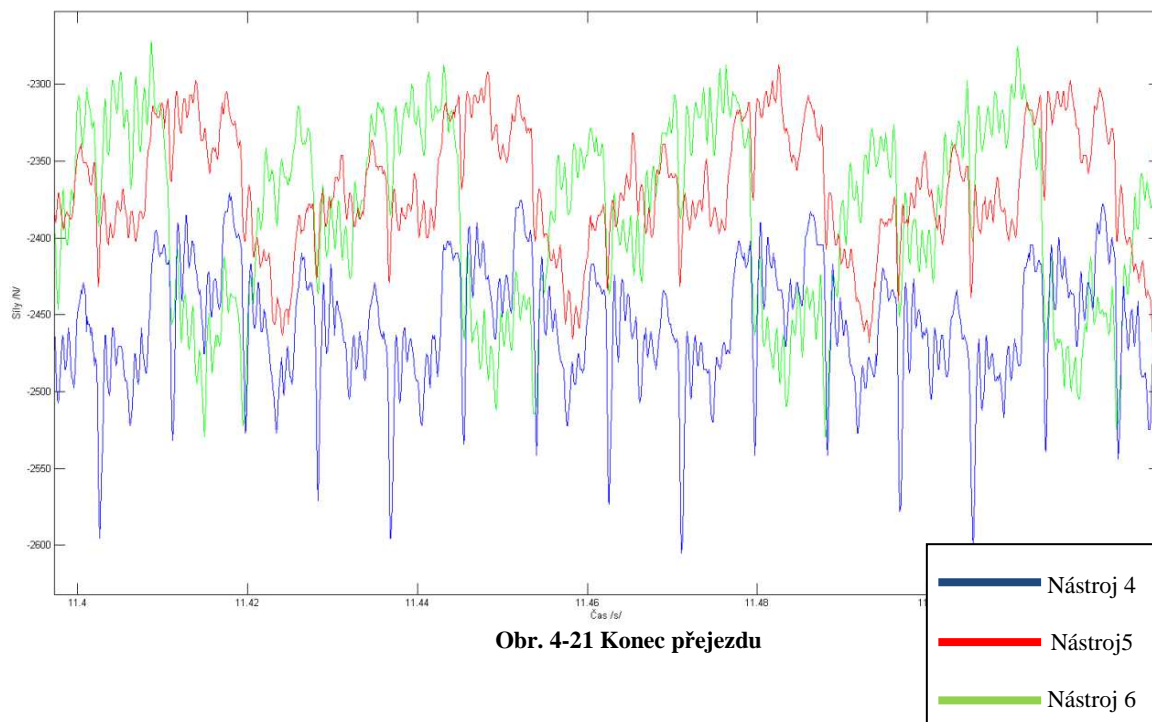
Začátek přejezdu:



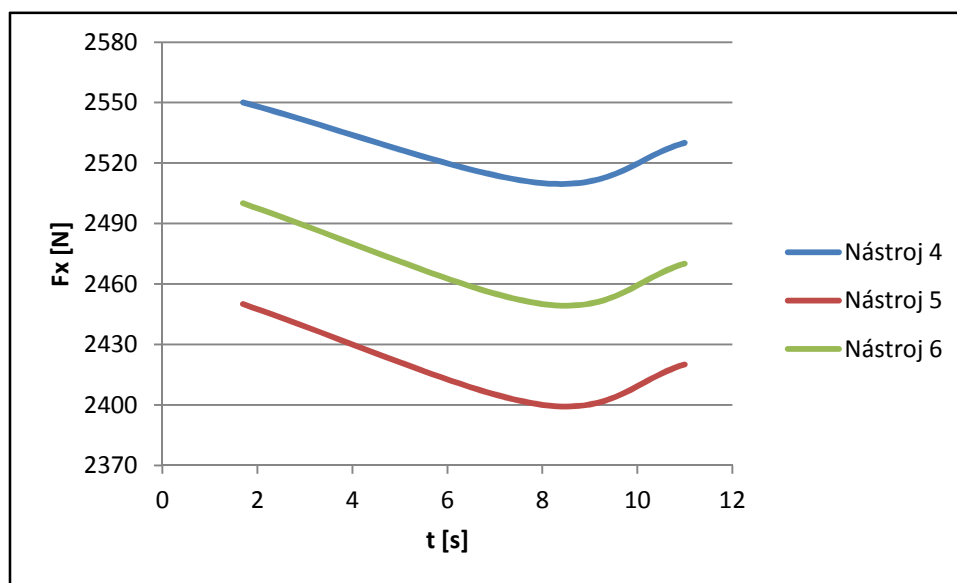
Střed přejezdu:



Konec přejezdu:



Už z obrázku Obr. 4-18 je patrné, že nejvyšších hodnot dosahoval nástroj 4 a naopak nejnižších hodnot nástroj 5. Po detailnějším zkoumání na obrázcích Obr. 4-19, Obr. 4-20, Obr. 4-21 je vidět, že na začátku přejezdu je hodnota F_x u všech nástrojů nejvyšší, ve středu klesá a následně opět narůstá až do konce přejezdu. Tento jev je vyobrazen na grafu Graf 4-12.



Nejvýraznější pokles lze sledovat u nástroje 5 a 6. Nástroj 5 má na začátku přejezdu řeznou sílu F_x cca 2450 N a poté klesne na 2400 N. U nástroje 6 je pokles řezné síly z 2500 N na 2450N. Následovně opět hodnoty stoupají na výchozí velikost.

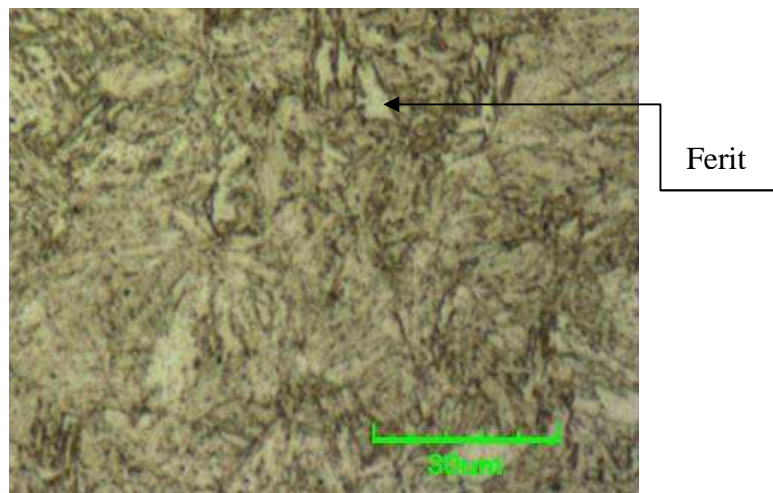
Je několik důvodů, proč dochází k tomuto poklesu. Jedním z nich může být odlišná struktura a mikrotvrdość obrobku, což způsobuje rozdílné chování při obrábění.

Z každého vzorku byly odebrány vzorky pro metalografii, kterou nám poskytla katedra KMM. Vzorky byly odejmuty jednak z nejbližšího maximálního jmenovitého průměru, tak i ze středu materiálu.

Kraj:

A

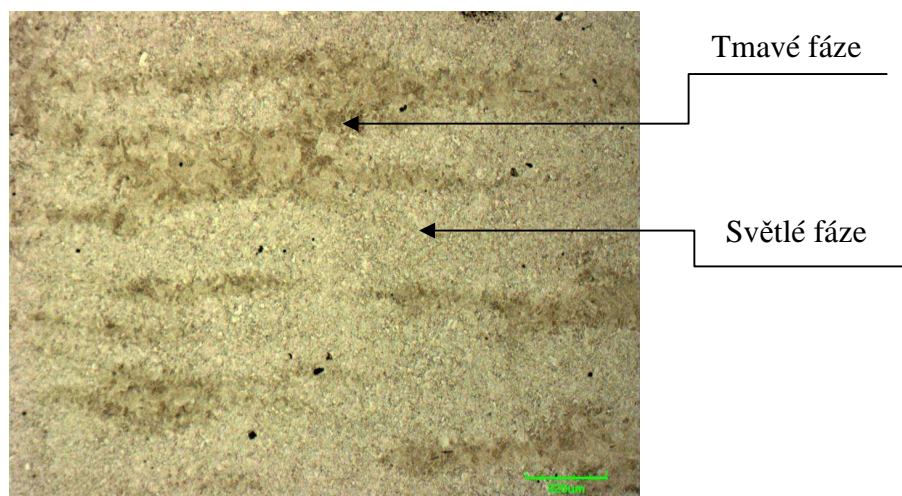
Mikrotvrdość [HV0,1]
254
263
247



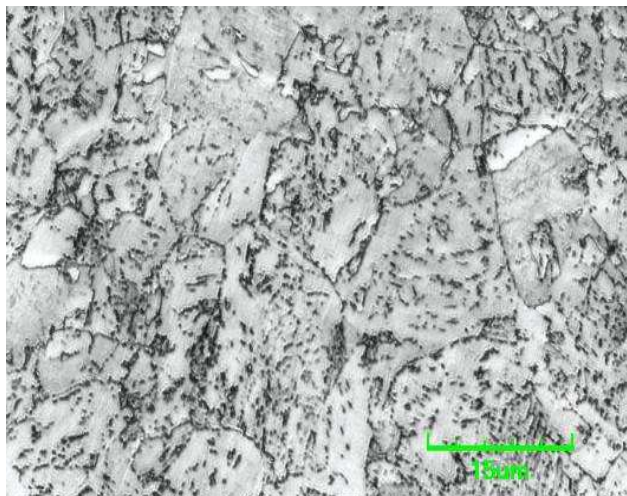
Střed:

B

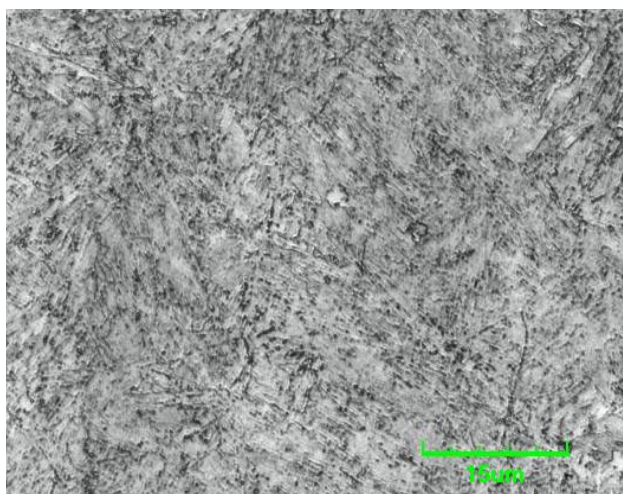
Mikrotvrdość [HV0,1]	
Světlé fáze	Tmavé fáze
231	269
211	261
215	290



C



D

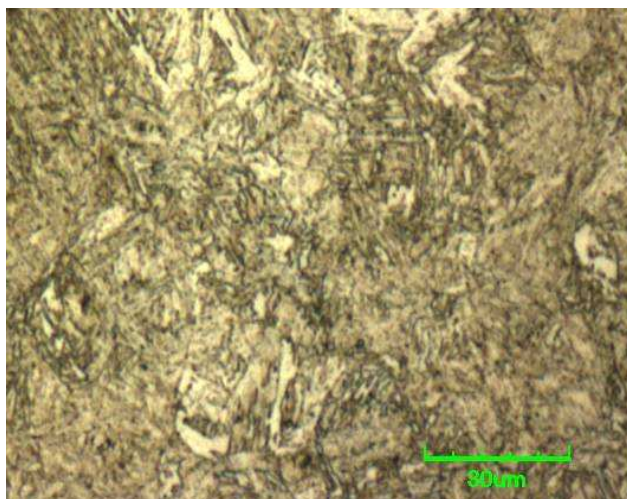


Obr. 4-22 Struktury vzorku A0

Kraj:

A

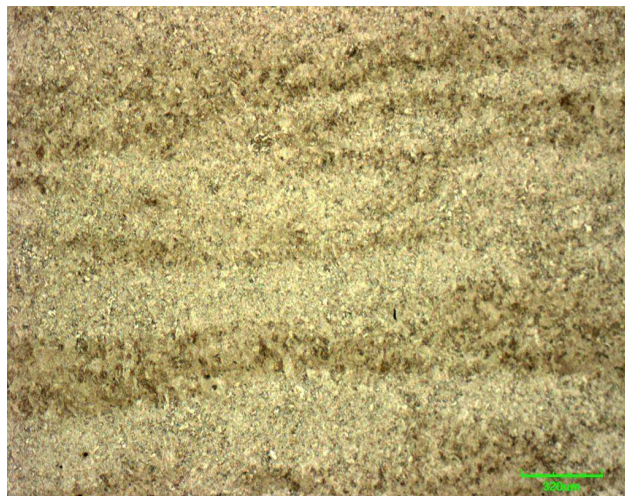
Mikrotvrdość [HV0,1]
266
251
243



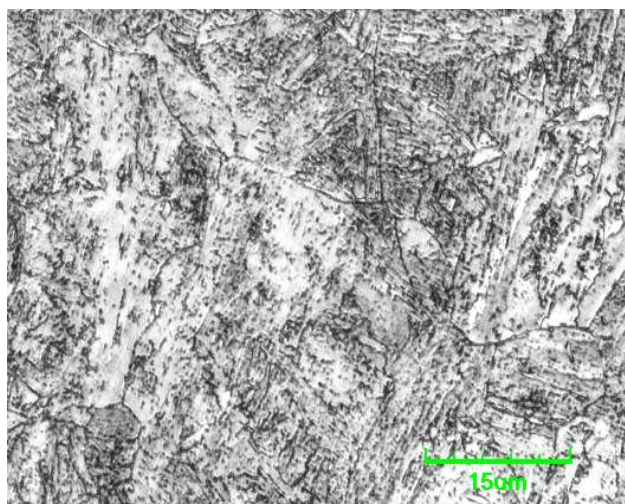
Střed:

B

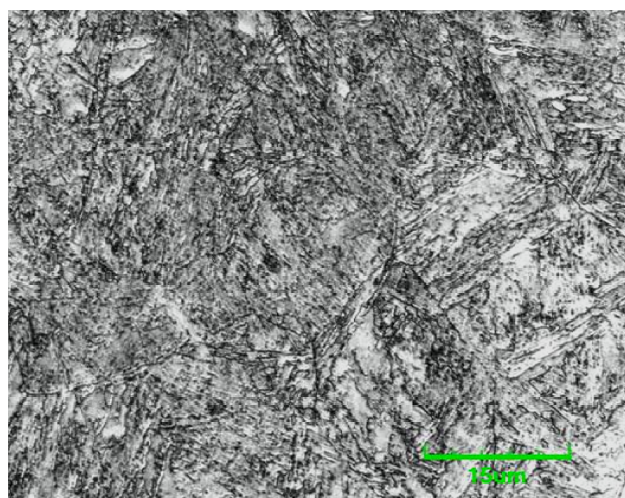
Mikrotvrdost [HV0,1]	
Světlé fáze	Tmavé fáze
226	243
222	260
227	301



C



D

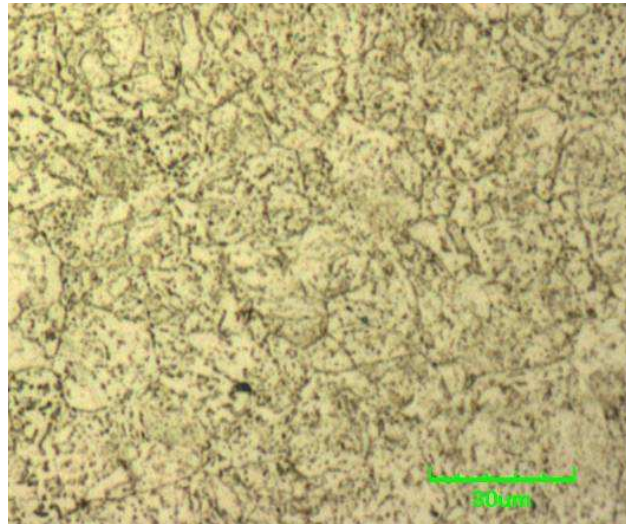


Obr. 4-23 Struktury vzorku B0

Kraj:

A

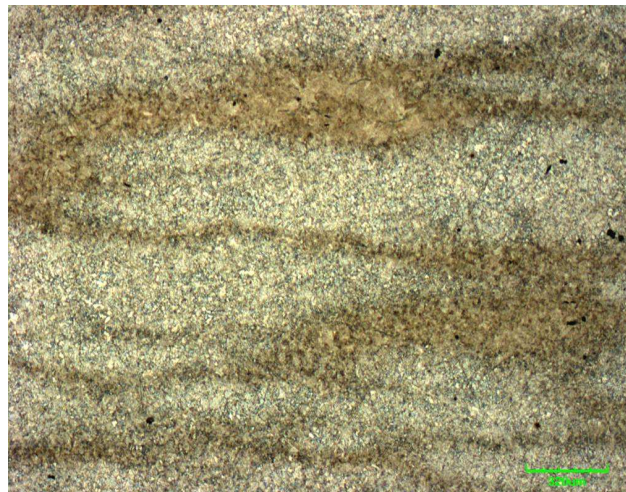
Mikrotvrdość [HV0,1]
287
292
332



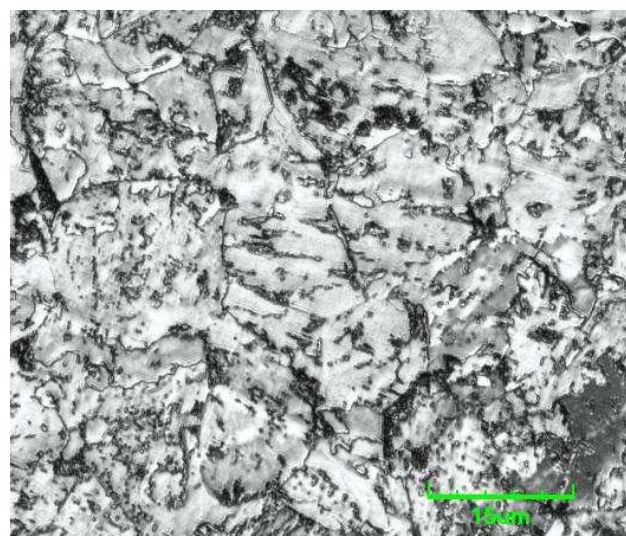
Střed:

B

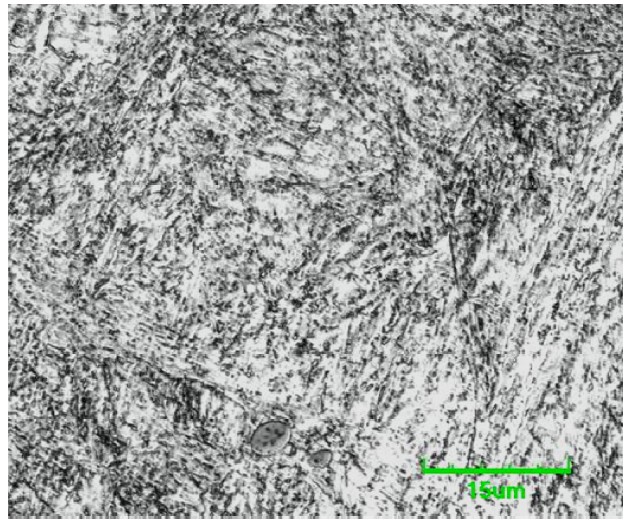
Mikrotvrdość [HV0,1]	
Světlé fáze	Tmavé fáze
274	310
285	312
253	328



C



D



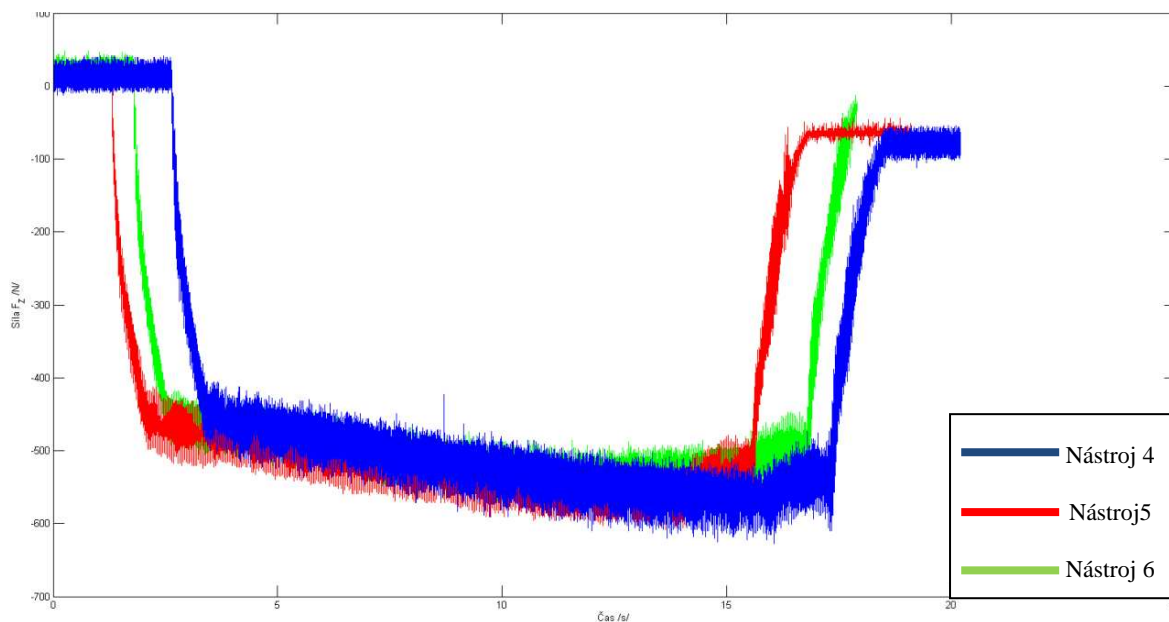
Obr. 4-24 Struktury vzorku C2

Metalografické pozorování prokázalo mikrostrukturní rozdíly ve vzorcích odebraných z povrchové a středové části obráběného materiálu. Tento jev se vyskytl u všech tří obráběných výkovek. Zatímco na povrchu je struktura tvořena feritickou matricí s globulárním cementitem a ojedinělými zrny feritu (obrázky A), u vzorků odebraných ze středu je patrná vyřádkovanost struktury (obrázky B).

Detailní analýza pak potvrdila odlišnou morfologii cementitu ve světlých a tmavých oblastech vzorku. Ve světlých oblastech tvoří cementit hrubší shluky vyloučené po hranicích i uvnitř zrn (obrázky C), v tmavších oblastech je cementit vyloučen ve formě jemnějších částic a homogenně rozprostřen zejména uvnitř feritických zrn (obrázky D).

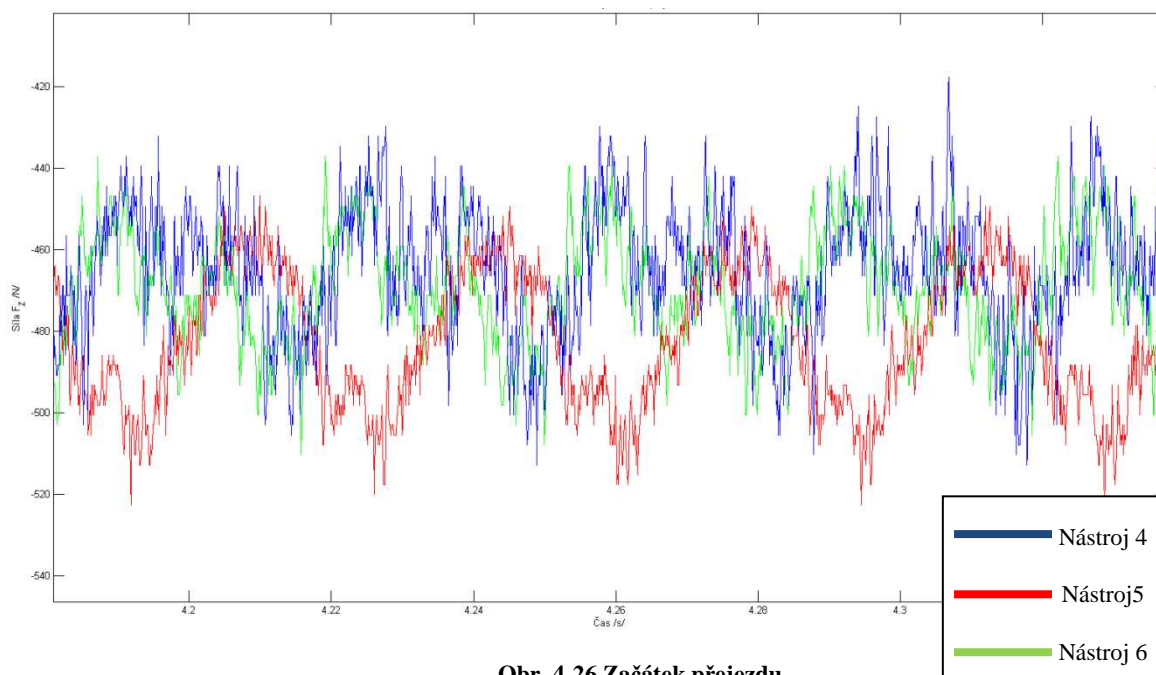
S metalografickým pozorováním koresponduje naměřený rozdíl mikrotvrdostí v jednotlivých oblastech. V tmavých oblastech je díky jemnějšímu a homogenně dispergovanému cementitu vyšší, a to až o 35%. Uvedená řádkovitost pravděpodobně souvisí s chemickou nehomogenitou polotovaru a pomalým odvodem tepla ve středu výkovku.

Dále byly vyhodnoceny síly F_z , které také byly shrnuty do grafu a následně vygenerovány jednotlivé úseky.



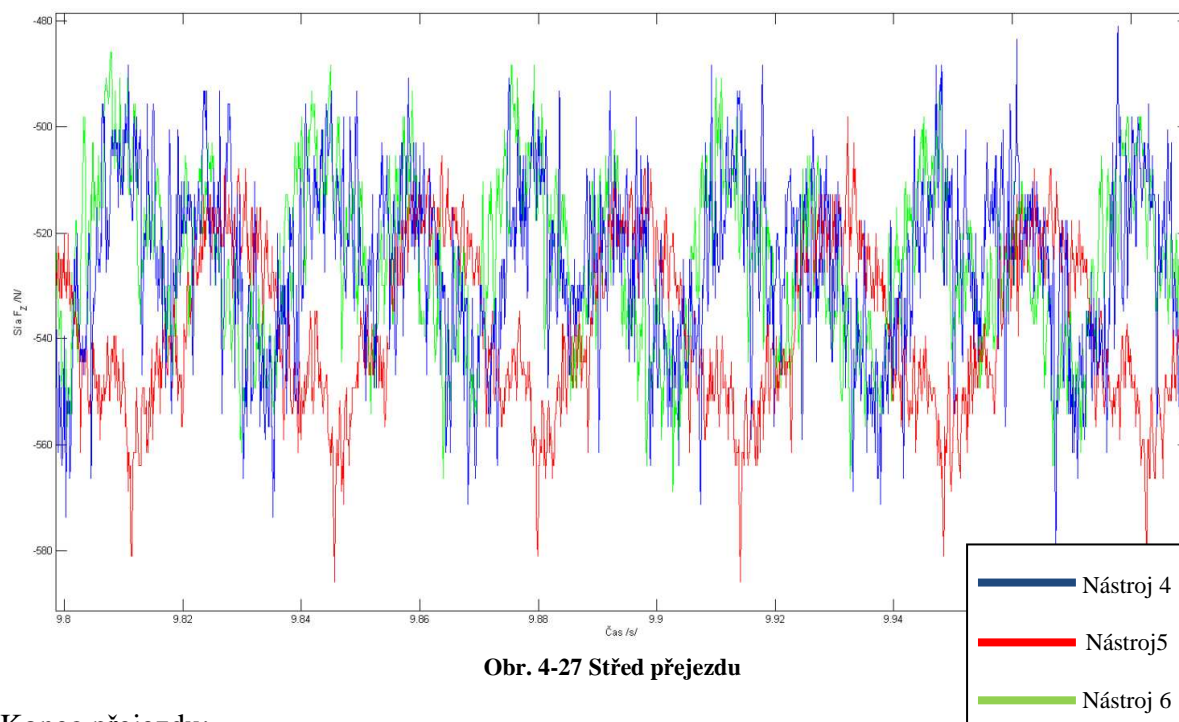
Obr. 4-25 Porovnání průběhu řezné síly F_z u čtvrtého přejezdu

Začátek přejezdu:

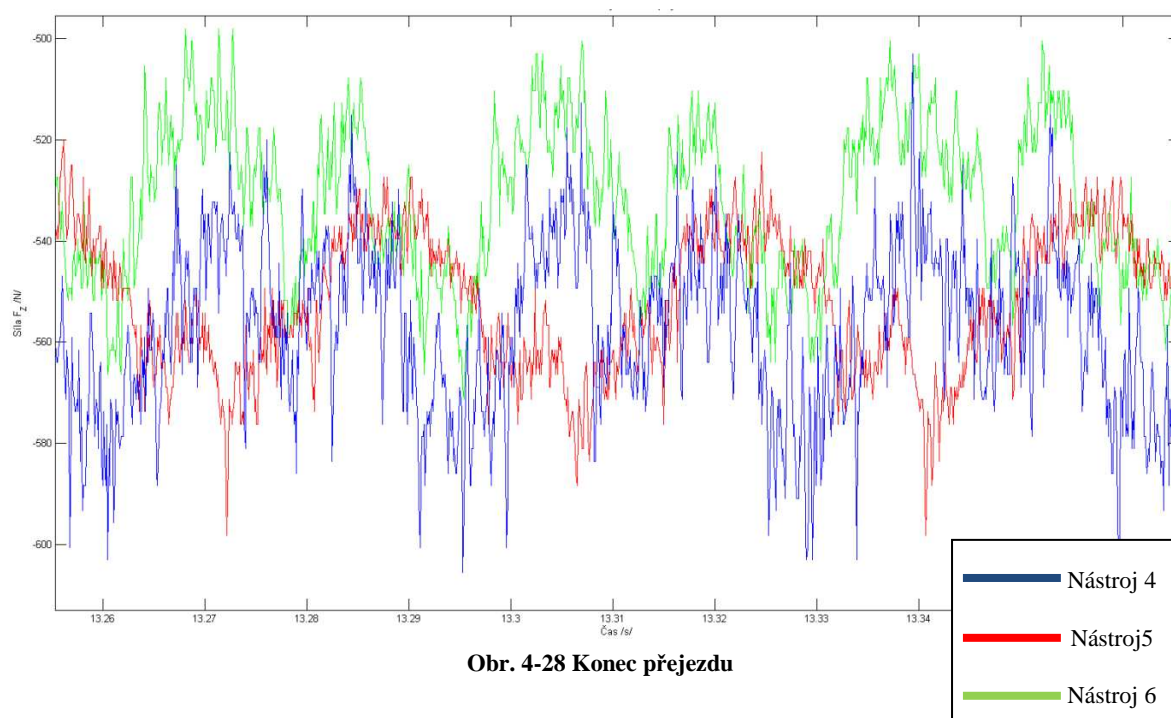


Obr. 4-26 Začátek přejezdu

Střed přejezdu:



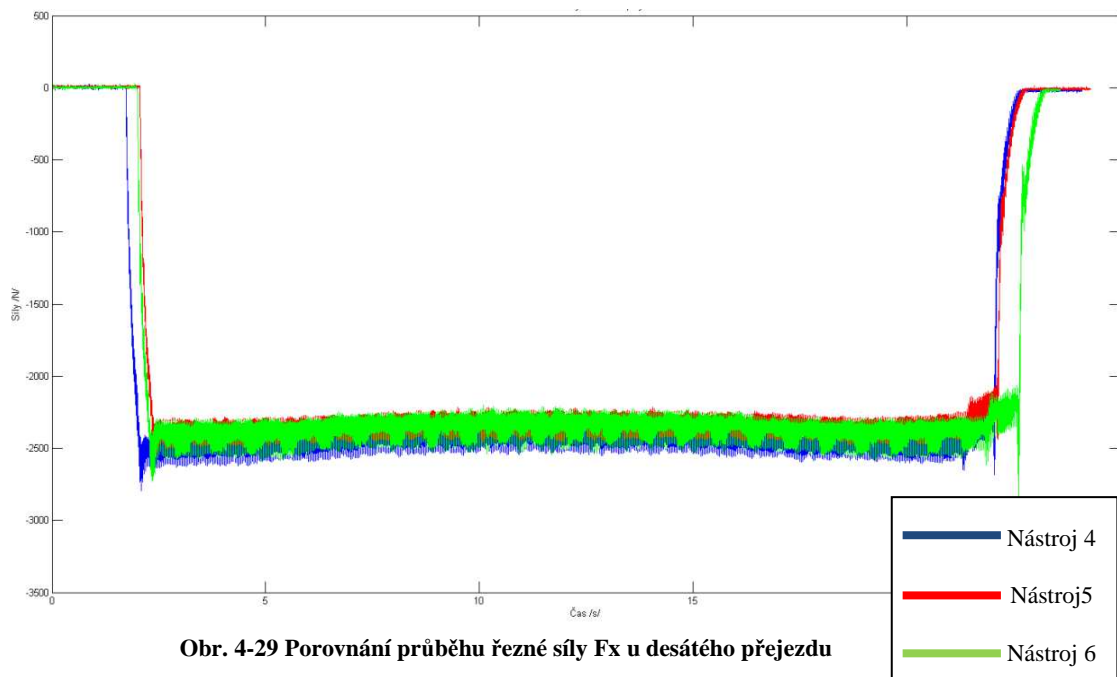
Konec přejezdu:



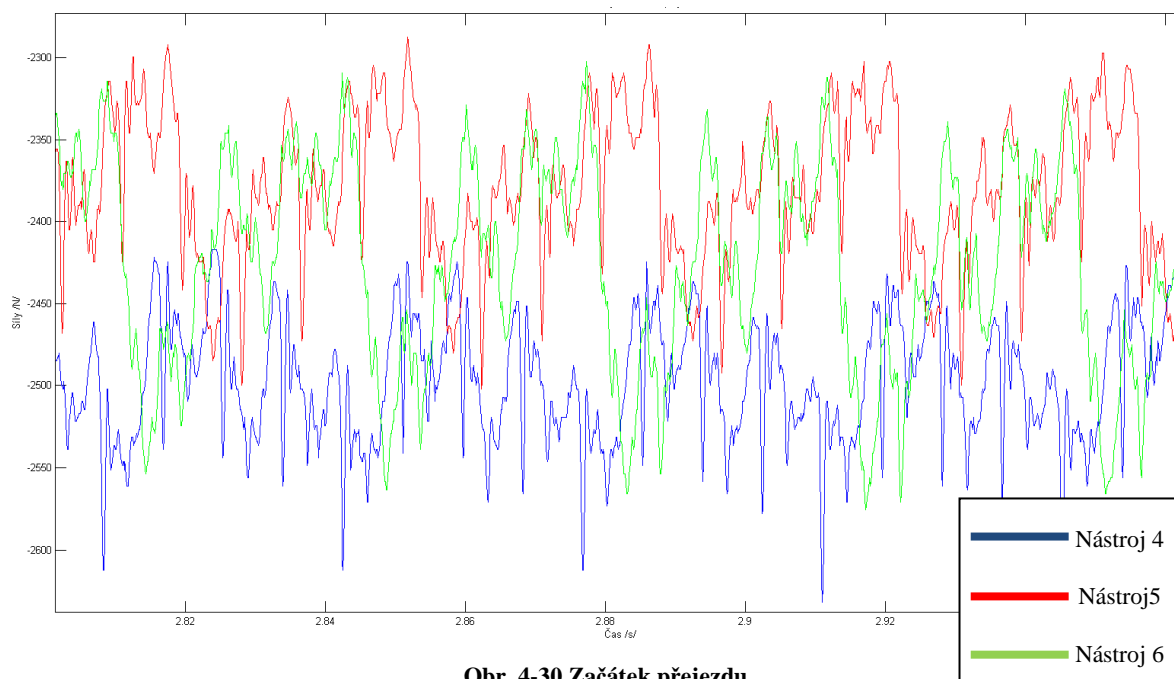
Z grafu lze zjistit, že z počátku přejezdu nejvyšší hodnoty řezné síly F_z dosahuje nástroj 5 a to $F_z = 510$ N. Během přejezdu se hodnoty těchto sil zvyšují. Na konci přejezdu je ale největší řezná síla F_z u nástroje 4, která narostla z hodnoty 490 N na 575 N.

Hodnocení nástroje na konci obrábění

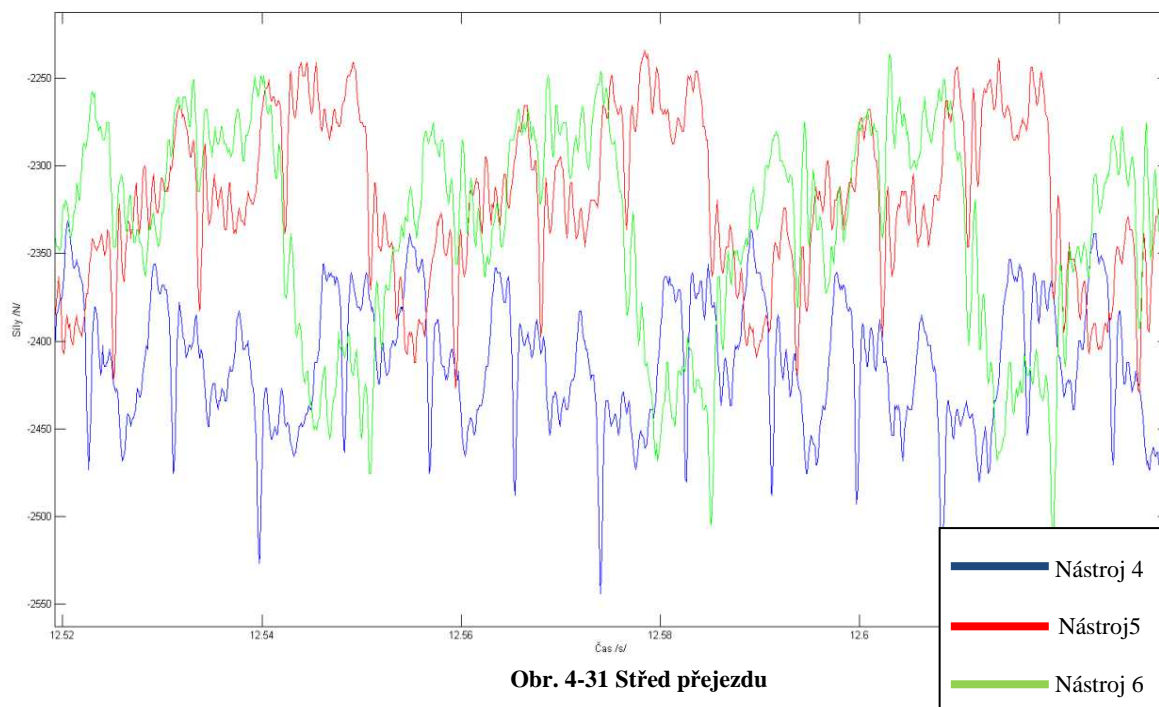
Postupovalo se stejným způsobem jako při hodnocení nástroje na začátku obrábění. Nejprve se vytvořil graf, kde byly porovnány řezné síly ve směru x F_x a poté se vygenerovaly detailnější časové úseky na začátku, středu a konci přejezdu.



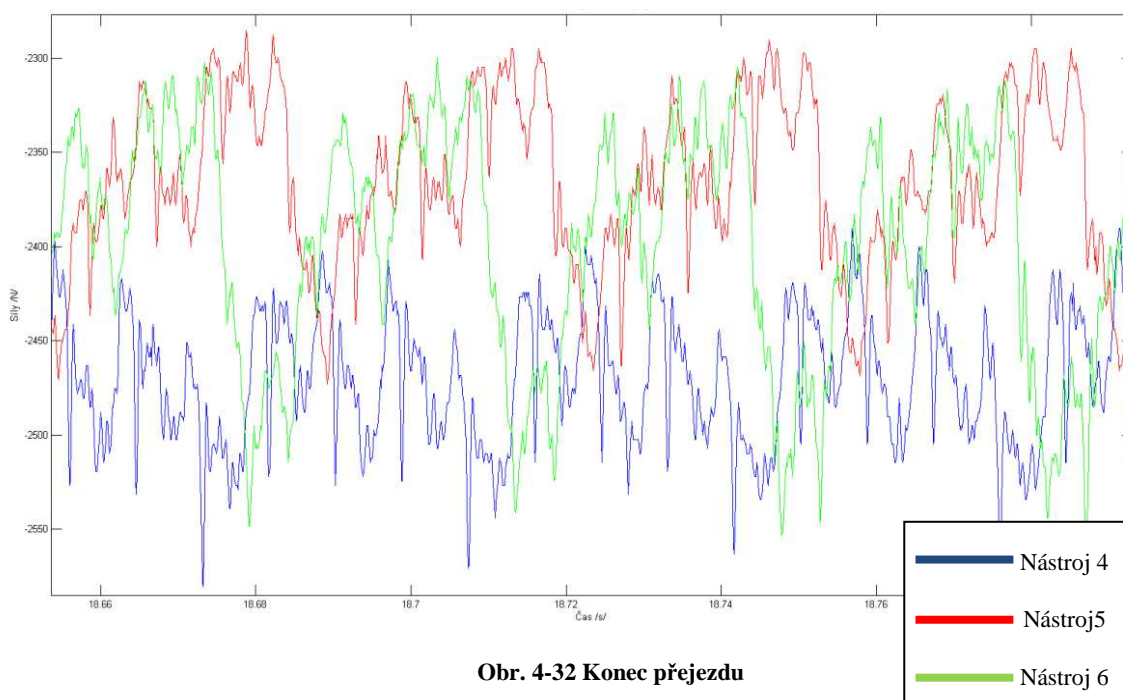
Začátek přejezdu:



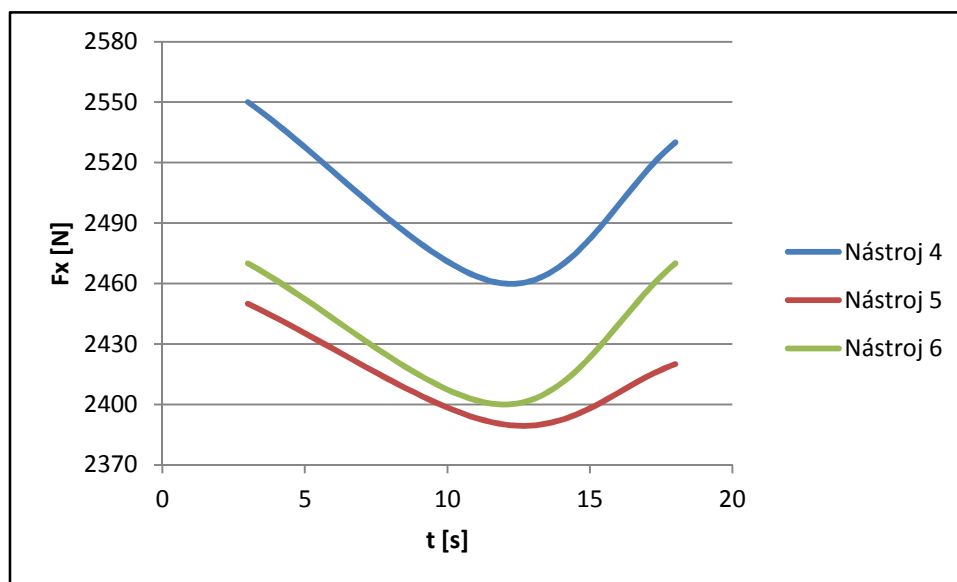
Střed přejezdu:



Konec přejezdu:

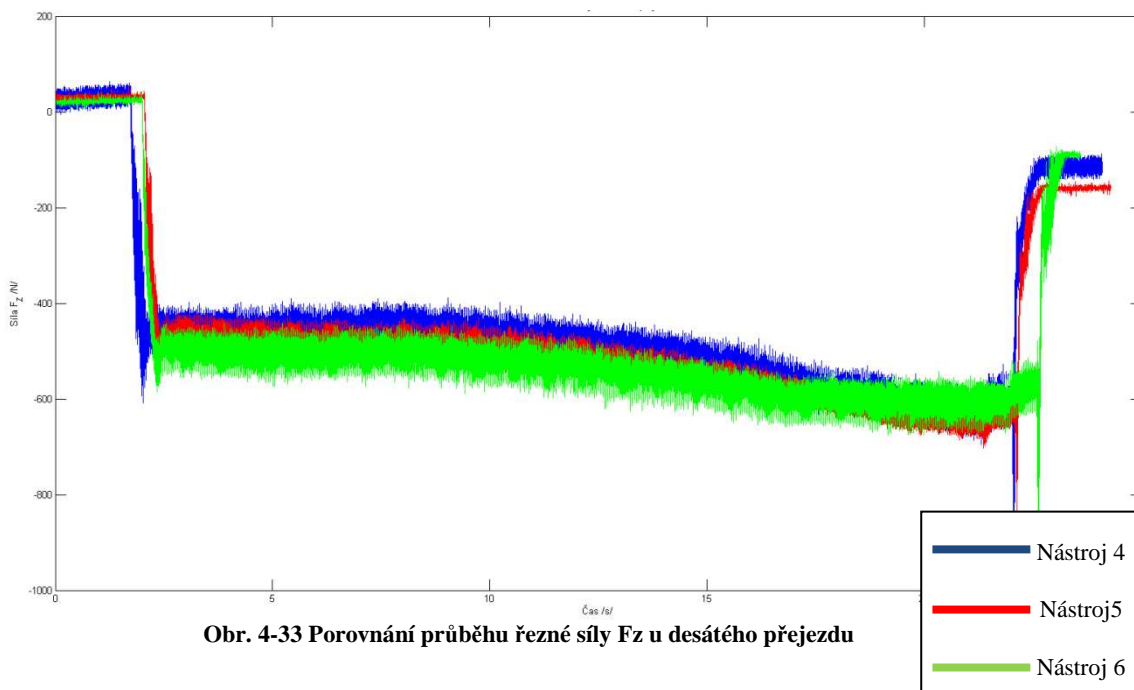


Už z celkového vyjádření síly F_x na obrázku Obr. 4-29 je zřejmé, že opět docházelo ve středu přejezdu k poklesu síly F_x a na konci přejezdu se síla vracela na počáteční velikost. Tentokrát snížení hodnoty síly F_x bylo mnohem vyšší než na začátku obrábění. Při frézování nástrojem 4 klesla síla F_x o 90 N. Opět je to kvůli odlišné struktuře a mikrotvrdosti materiálu.



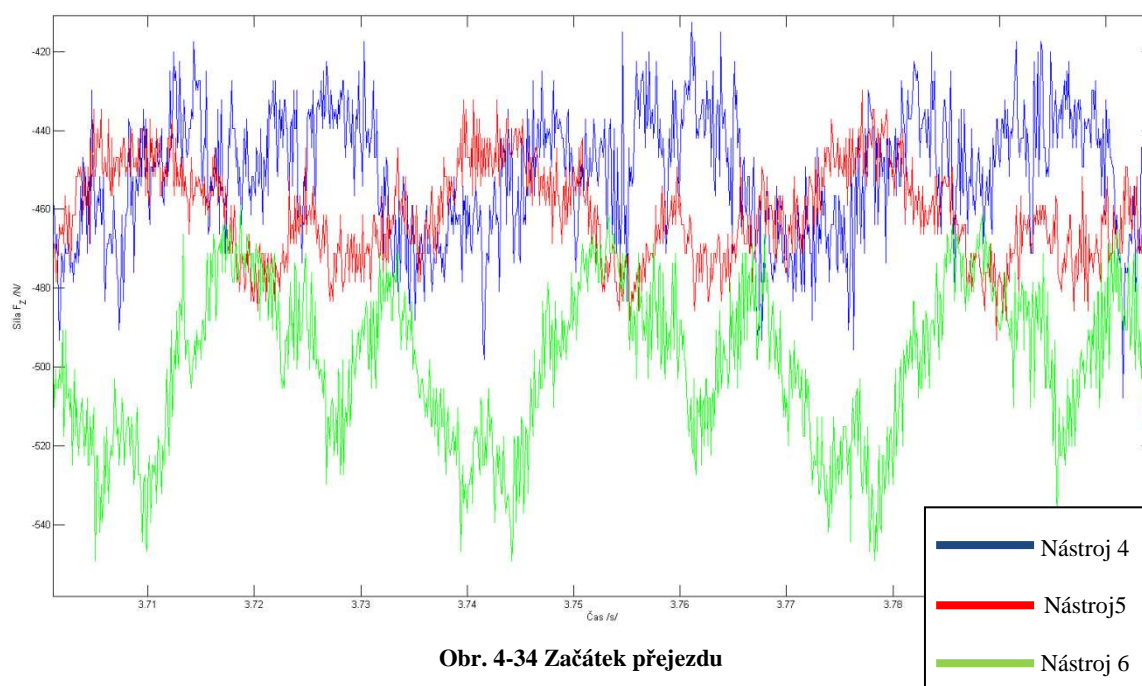
Graf 4-13 Pokles řezné síly F_x

Dále se opět vyhodnotila řezná síly F_z pro všechny tři nástroje a byly vygenerovány jednotlivé časové úseky.



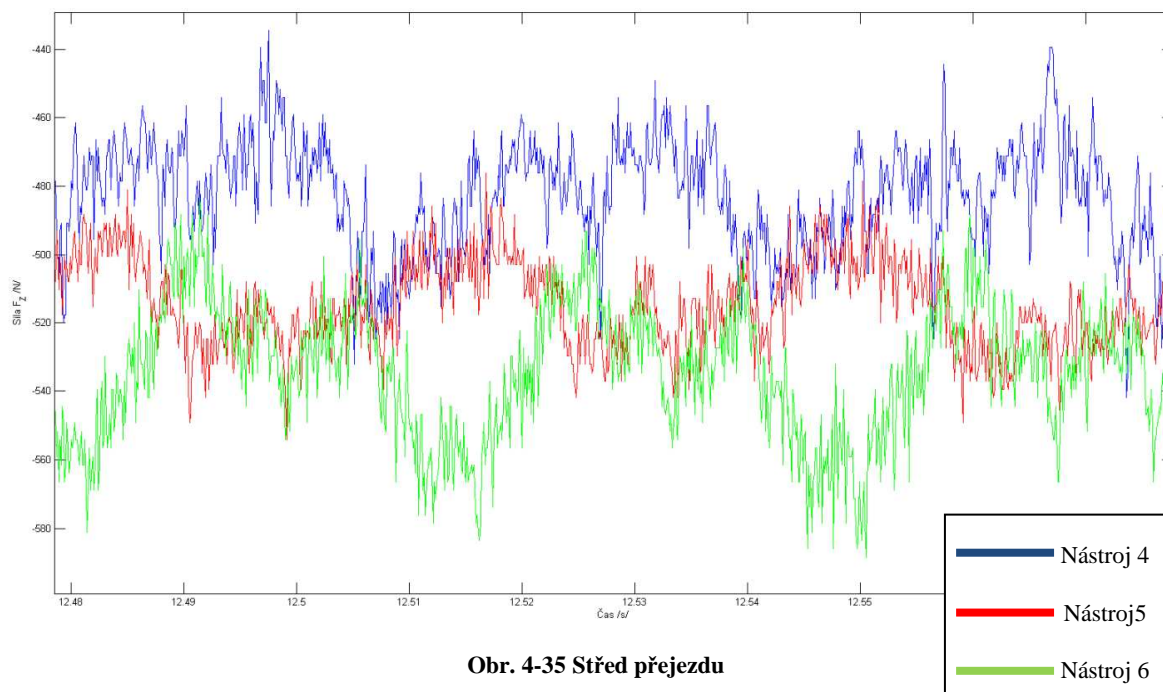
Obr. 4-33 Porovnání průběhu řezné síly F_z u desátého přejezdu

Začátek přejezdu:



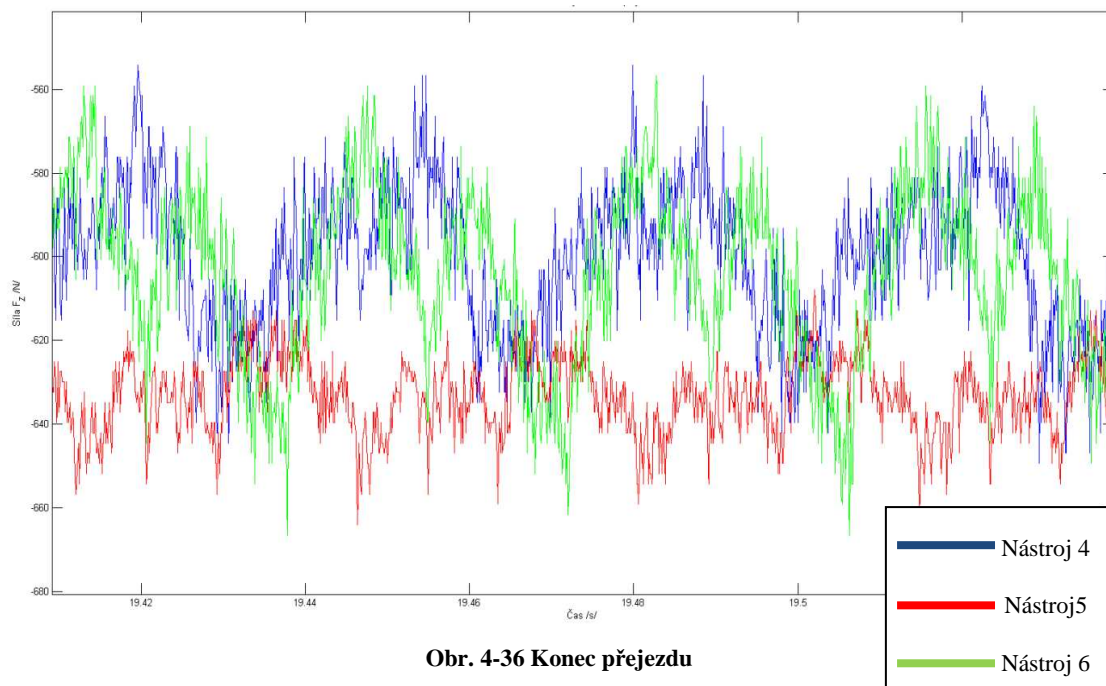
Obr. 4-34 Začátek přejezdu

Střed přejezdu:



Obr. 4-35 Střed přejezdu

Konec přejezdu:



Obr. 4-36 Konec přejezdu

Z počátku přejezdu měl nejvyšší hodnoty síly F_z nástroj 6 a to přibližně okolo 510 N. To samé platilo i ve středu přejezdu, kdy se její hodnota zvýšila ještě o 50 N. Ze společného obrázku Obr. 4-33, kde jsou vyobrazeny síly všech nástrojů, je patrné, že na konci přejezdu nejvyšších hodnot řezné síly F_z dosáhl nástroj 5. Hodnota síly byla zhruba 640 N. Lze si všimnout, že v porovnání s hodnotami řezných sil ze začátku obrábění se velikosti zvýšily. A to v důsledku nárůstu opotřebení.

5 Technicko-ekonomické zhodnocení

Obrobitelnost lze kvalifikovat za dobrou při splnění jednoho či více z následujících kritérií: obrábění s minimálními energetickými požadavky, minimální opotřebení nástroje, minimální řezné síly, eliminace problémů s utvářením a odvodem třísek, dobrá kvalita povrchu na obrobené ploše atd. Jinými slovy lze říct: dobrá obrobitelnost představuje co nejehospodárnější výrobu za daných technologických podmínek. [2]


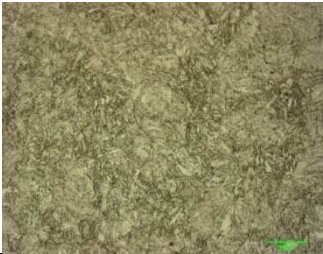



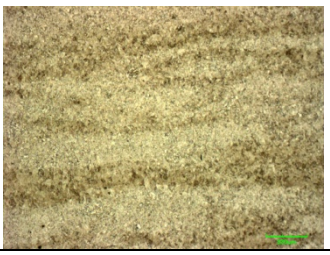

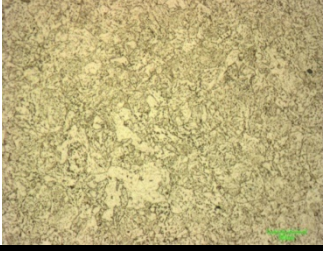
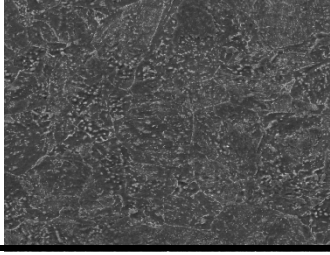
V tabulce Tab. 5-1 jsou shrnuty všechny hodnoty, které byly získány během experimentu (hodnoty řezných sil, opotřebení a vzniklé třísky), z dokumentace od jednotlivých kováren (tvrdost HB a cena) a jednotlivé struktury a mikrotvrdost, které nám poskytla katedra KMM.

Ve vzorku A0, který byl dodaný Kovárnou I, se vyskytuje mnoho oblastí s feritem a řádkovitost zde není tolik patrná jako u ostatních vzorků. Proto je tento vzorek je měkčí a dá se předpokládat, že docházelo během frézování k adhezi na břit nástroje a proto je zde hodnota opotřebení VB_B nejvyšší, i přes to, že mikrotvrdost nedosahuje nejvyšších hodnot. Vlivem adheze docházelo k intenzivnímu vzniku nárůstku a tudíž k poškozování břitu nástroje. Nárůstek měl také vliv na řezné síly, které byly při obrábění tohoto vzorku nejvyšší.

Více homogenní vzorek C2, který poskytla Kovárna III, má ze všech vzorků jak na kraji, tak ve středu nejvyšší hodnoty mikrotvrdosti. Zde došlo k nejintenzivnějšímu rovnoměrnému vyloučení jemných částic cementitu uvnitř feritických zrn. I přes velké tvrdosti, zde převažovala čistá abraze než adheze materiálu, neboť oblastí feritu je ve struktuře minimum a docházelo k rovnoměrnému, plynulému opotřebení a proto hodnoty VB_B jsou u tohoto vzorku nejnižší. Z důvodu velké tvrdosti bylo tepelné zatížení břitu při obrábění vysoké a docházelo zde k největšímu tření do první poloviny maximální hloubky třísky vlivem odtlačování nástroje, a proto je zde největší a nejtmaší zabarvení třísky.

Vzorek s označením B0 se ve výsledku pohybuje mezi už zmíněnými dvěma vzorky. Ve struktuře se vyskytuje nepatrný počet feritu, značná řádkovitost a byl zde také vyloučený globulární cementit. Hodnoty opotřebení dosáhly podobné velikosti jako u vzorku C2. Je proto možné předpokládat, stejný průběh poškozování břitu nástroje jako u předchozího vzorku.

Nástroj	Vzorek	Cena [Kč]	Mikrotvrdost [HV0,1]		Tvrдость [HB]	Síla Fx [N]		Síla Fz [N]	
			Kraj	Střed		Začátek	Konec	Začátek	Konec
4	19630 (A0) K I	2578	254	219/273	242	2550	2530	480	620
5	18825 (B0) K II	3000	253	225/268	242	2450	2420	480	640
6	19216 (C2) K III	5200	303	270/316	240	2470	2470	510	630

Opotřebení VB _B [mm]	Tříška	Struktura	
		Kraj	Střed
0,107			
0,084			
0,077			

Tab. 5-1 Sumarizované výsledky

V tabulce jsou z výrobního pohledu ohodnoceny nejdůležitější parametry tzv. bodovým hodnocením. Jako důležité parametry byly zvoleny: cena, rozdíl mikrotvrdosti na povrchu a středu vzorku, tvrdost [HB] a pás zabarvení vzniklé třísky. Konkrétní hodnoty jednotlivých parametrů byly na body převedeny takto:

- **cena** – limitní hodnota 2500 Kč 10 bodů
navýšení ceny o 200 Kč -1 bod
- **rozdíl mikrotvrdosti** – limitní hodnota 0 10 bodů
rozdíl tvrdostí o 2 HV0,1 -1 bod
- **tvrdost** – limitní hodnota 240 HB 10 bodů
vzrůst tvrdosti o 10HB -1 bod
- **pás zabarvení** světlý 10 bodů
tmavší 5 bodů
nejtmavší 0 bodů

Vzorek	Cena	Rozdíl mikrotvrdosti	Tvrdost	Pás zabarvení	Celkový počet bodů
19630 (A0) K I	10	6	10	5	31
18825 (B0) K II	8	6	10	10	34
19216 (C2) K III	0	5	10	0	15

Tab. 5-2 Bodové hodnocení

Z hlediska bodového hodnocení vyšel nejlépe vzorek B0 z Kovárny II. Během reálných ověřovacích experimentů prováděné firmou Wikov Gear s.r.o., kdy byly vyráběny pastorky z polotovarů dodaných od různých kováren, nedocházelo k žádnému poškozování boku zubů ani výraznému opotřebení nástroje a bylo docíleno požadované kvality obrobeného povrchu. Výroba probíhala za konstantních řezných podmínek, proto strojní hodinová sazba zůstává po celou dobu výroby stejná. Pro firmu je dominantní rozhodující parametr cena, tudíž i přes různé horší vlastnosti, které neměly nakonec na výrobní proces vliv, lze zvolit za nejlepší variantu vzorek A0 dodaný Kovárnou I.

6 Závěr

Zadání této diplomové práce bylo iniciováno firmou Wikov Gear s.r.o., která je významným výrobcem mechanických převodových zařízení pro nejrůznější aplikace a obory lidské činnosti. Společnost je aktivní v mechanickém strojírenství více než 125 let. Přes 80 let je tradičním výrobcem ozubených kol a mechanických převodovek. Zkušenosti vytvářené a předávané z generace na generaci v kombinaci s moderními výrobními technologiemi umožňují vyrábět špičkové produkty s progresivním konstrukčním řešením a nadstandardními technickými parametry.

Zadavatel diplomové práce se setkává s problémem výskytu trhlin a prasklin vzniklých při tepelném zpracování vlivem potřhaného povrchu zubů. Správná volba a dodržení technologického postupu, jsou podstatné podmínky pro předcházení vzniku trhlin. Jejich důvodem mohou být i chyby zděděné z předcházejících fází výroby jako jsou například skryté a strukturní vady, odlišná mikrotvrdość, konstrukční nedostatky apod.)

Posouzení obrobitelnosti lze provést z kvalitativního, ekonomického a technologického hlediska. Do prvního zmiňovaného hlediska lze přiřadit drsnost povrchu, stav napjatosti povrchu či přesnost. V rámci experimentu toto hledisko nebylo hodnoceno, neboť kvalita obrobeného povrchu byla po frézování u všech vzorků velmi špatná. Z ekonomického hlediska, do kterého lze zahrnout trvanlivost nástroje nebo množství odebraného materiálu před úplným opotřebením řezné hrany, vyšel nejlépe materiál z Kovárny III. Hodnota opotřebením nástroje, s kterým se frézoval tento vzorek, byla ze všech získaných hodnot nejnižší. Další technologická měřítka jsou řezné síly a výkon, teplota, utváření třísky atd. Nejvyšší hodnoty složky řezné síly F_x jsou patrné u vzorku 19630. Rozdíl hodnot složky řezné síly F_z není tak výrazný. Tvar a odchod třísky byl po celou dobu obrábění u všech vzorků stejný. Třísky se lišily pouze délkou a odstínem zabarvení, které záviselo na tvrdosti, intenzitě lepení materiálu a teplotě v místě řezu.

Obrobitelnost stejného materiálu o stejném chemickém složení a velmi podobnou tvrdostí se může lišit v závislosti na zpracování jednotlivých kováren. Nelze ale říci, že by se obrobitelnost lišila přímo skupinou, ale po detailnějším zkoumání ze sumarizovaných výsledků jsou patrné rozdíly, které mají na obrobitelnost vliv.

Použitá literatura

- [1] Příručka obrábění: kniha pro praktiky. 1. čes. vyd. Praha: Sadvik, 1997. 45 s., I-2 - XIII-33 s. ISBN 91-972299-4-6.
- [2] <http://www.mmspektrum.cz>
- [3] <http://www.techno-mat.cz>
- [4] Studijní materiály KTO/TO
- [5] http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf
- [6] http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_07.pdf
- [7] Studijní materiály KMM/MO
- [8] Studijní materiály KTO/ST
- [9] HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM publishing, 2008. 235s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [10] <http://www.sandvik.coromant.com>
- [11] <http://ateam.zcu.cz>
- [12] ČSN ISO 10825 Ozubená kola - Opotřebenění a poškození zubů - Terminologie
- [13] <http://www.kto.zcu.cz>
- [14] <http://www.zps-fn.cz>
- [15] <http://prirucka.bolzano.cz>
- [16] Studijní materiály KTO/EMO
- [17] ADAMEC, Jaromír, ed. et al. Obrobitelnost strojírenských materiálů. 1. vyd. Ústí nad Labem: Univerzita J.E.Purkyně, 1998. 109 s. Strojírenská technologie. Knihovnička; sv. 1. ISBN 80-7044-232-8.
- [18] KLEINOVÁ, Jana. Ekonomické hodnocení výrobních procesů. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. ISBN 80-7043-364-7.

PŘÍLOHY DIPLOMOVÉ PRÁCI

Vliv obráběného materiálu při frézování ozubení na proces
obrábění

Autor: **Bc. Nikola KLIČKOVÁ**

SEZNAM PŘÍLOH:

PŘÍLOHA P1....Charakteristika materiálu 18CrNiMo 7-6

PŘÍLOHA P2.... Parametry obráběcího centra MCV 75 A

PŘÍLOHA P3.... Charakteristika obrobku

PŘÍLOHA P4.... Zařízení pro měření řezných sil

PŘÍLOHA P5... Optický mikroskop MULTICHECK PC500


Příloha P1: Charakteristika materiálu 18CrNiMo 7-6

Přehled vlastností oceli 18CrNiMo7-6										1.6587								
Druh oceli	Středně legovaná ušlechtilá chrom-niki-molybdenová ocel k cementování																	
TDP	CSN EN 10084																	
Dřívější označení	17CrNiMo6 podle DIN 17210																	
Charakteristika	Velmi namáhané strojní součásti s cementovaným povrchem. Cementovaná vrstva po tepelném zpracování dosahuje na povrchu tvrdosti 62 až 64 HRC, zatímco jádro cementované součásti je i při relativně vysoké pevnosti značně houževnaté. Přísada Mo zvyšuje prokalitelnost, ocel prokaluje do hloubky přibližně 60 mm. Je vhodná pro dynamicky namáhané součásti.																	
Chemické složení v % hmot. (rozbor tavby)	C	Si max.	Mn	P max.	S max.	Cr	Mo	Ni	Al									
	0,15 - 0,21	0,40	0,50-0,90	0,035	0,035	1,50-1,80	0,25-0,35	1,40-1,70	Při kontrolované velikosti austenitického zrna 0,015-0,050 (informativně, naniž uváděno v normě).									
Dovolené odchylky ve výrobku od rozboru tavby ³⁾	±0,02	±0,03	±0,04	±0,005	±0,005	±0,05	±0,03	±0,05										
Mechanické vlastnosti v jádře referenčního vzorku po kalení a popouštění při 150-200 °C (uvedené hodnoty nejsou součástí EN 10084) ¹⁾	Průměr mm		Rp0,2 min MPa		Rm MPa		A min %		Z min %		KCU min. J.cm ⁻²							
	d ≤ 11		980		1230 - 1520		9		-		30							
	11 < d ≤ 25		735		980 - 1320		9		-		35							
	25 < d ≤ 50		640		885 - 1080		10		-		35							
	50 < d ≤ 100		490		665 - 960		11		-		35							
Hodnoty tvrdosti HB pro stav :	Zpracováno na stříhatelem (stav S)			Žháno na měkko (A)			Zpracováno na rozmezí tvrdosti (TH)			Zpracováno na feriticko-perlitickou strukturu (FP)								
	max. 255			max. 229			179 - 229			159 - 207								
	Stav po válcování			Stav po normalizaci			Žháno na globulární cementit (vhodné pro tváření za studena)			max. 180 ⁴⁾								
	ca 270 ⁴⁾			ca 260 ⁴⁾														
Prokalitelnost ²⁾	Druh	Meze	Vzdálenost od plochy kaleného čela v mm															
			tvrdost v HRC															
	H	max.	1,5	3	5	7	9	11	13	15	20	25	30	35	40			
			min.	40	40	39	38	37	36	35	34	32	31	30	29	29		
	HH	max.	48	48	48	48	47	47	46	46	44	43	42	41	41			
			min.	43	43	42	41	40	40	39	38	36	35	34	33	33		
	HL	max.	45	45	45	44	44	43	42	42	40	39	38	37	37			
			min.	40	40	39	38	37	36	35	34	32	31	30	29	29		

Technologické vlastnosti							
Tváření za tepla	Doporučené rozmezí teplot pro tváření za tepla : 1100 až 900 °C						
Tepelné zpracování	Normalizační žhání °C	Žhání na měkko °C	Isotermické žhání °C	Teplota cementace °C ^{a)}	Teplota kalení na jádro °C ^{b)}	Teplota kalení na vrstvu °C	Teplota popouštění °C ^{c)}
	850	600 až 680	850 až 950 640-3 hod.	880 až 980	830-870 olej	780 až 820 olej	150 až 200
Body přeměny: A _{c1} -735°C, A _{c3} -810°C, Ms (základní materiál)-360°C, Ms (cementovaná vrstva)-190°C Uvedené podmínky jsou doporučené. a) při jednoduchém kalení se ocel kalí z teploty cementace nebo nižší (závisí na tvaru výrobku). b) mimo oleje přichází v úvahu i teploty lázně 160 až 250° C. Způsob ochlazování závisí na tvaru výrobku s ohledem na možné deformace po kalení. c) doba popouštění minimálně 1 hod.							
Obrobitelnost	Pro dobrou obrobitelnost je výhodný stav FP po případě stav A						
Stříhateľnost	Ocel je stříhateľná za studena ve stavu žháném						

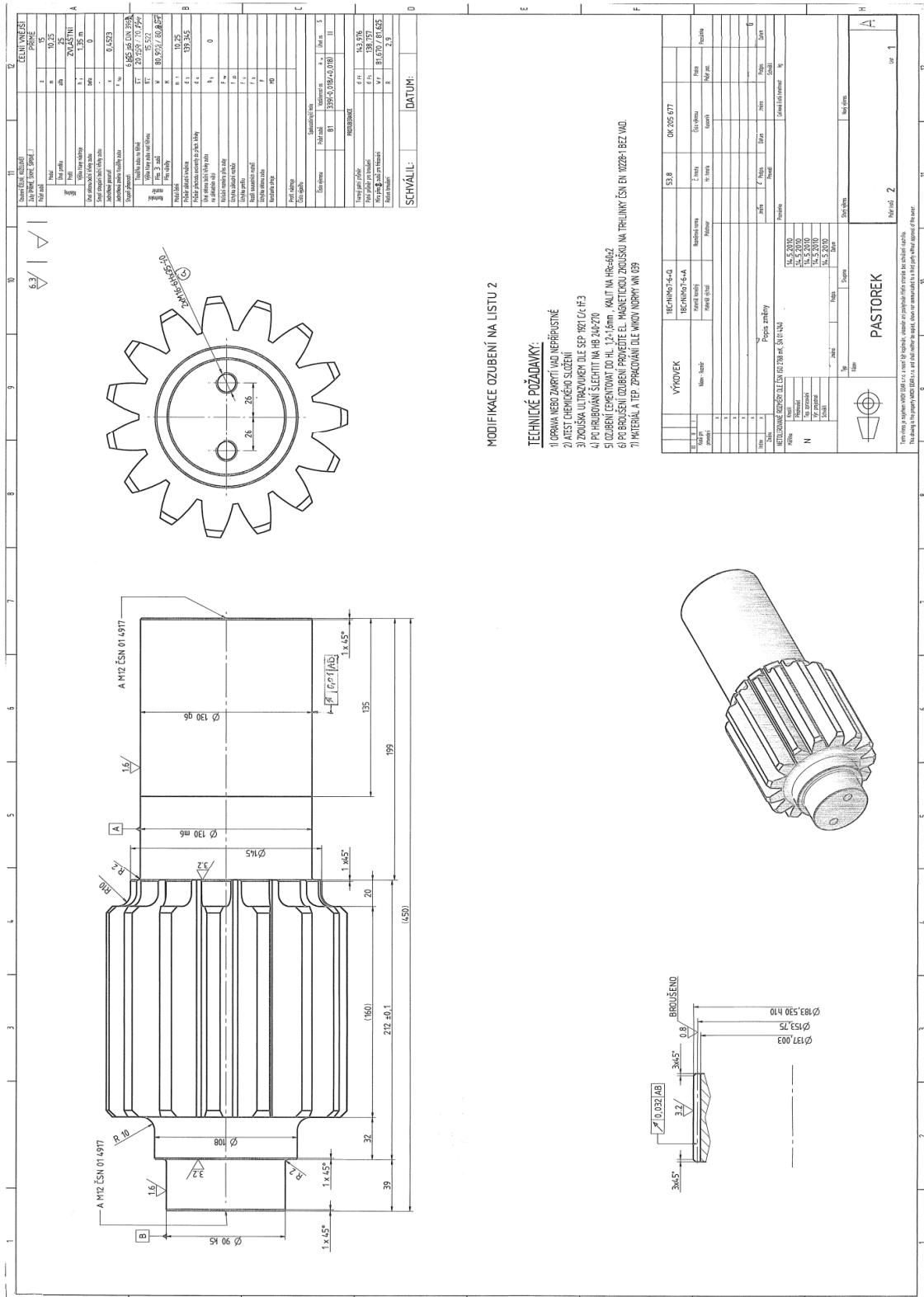
Obr. P1-1 Materiálový list oceli 18CrNiMo 7-6 [15]

Příloha P2: Parametry obráběcího centra MCV 75 A

Druh	vertikální obráběcí centrum	
Typ	MCV 750 A	
Počet CNC řízených	3	
Jmenovitý výkon	16 kW	
Rozsah otáček	20 – 13000 min-1	
Změna otáček	plynulá	
Zdvih v ose X, Y, Z	750, 500, 500 mm	
Rozměry upínacího	1000x500 mm	
Pracovní posuvy X,	1-15000 mm.min-1	
Rychloposuvy X, Y,	25 m.min-1	
Řídicí systém	Heidenhein TNC 426	

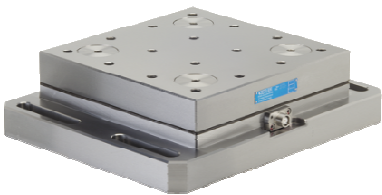
Obr. P2-1 Obráběcí centrum MCV 75 A [13]


Priloha P3: Charakteristika obrobku

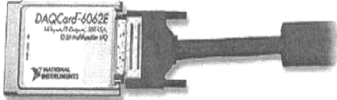


Obr. P3-1 Výkres pastorku


PŘÍLOHA P4: Zařízení pro měření řezných sil

Dynamometr KISTLER 9225 A		
Rozsah ve směru x	-20 až 20 kN	 <p>Obr. P4-1 Dynamometr KISTLER 9225 A [13]</p>
Rozsah ve směru y	-20 až 20 kN	
Rozsah ve směru z	-10 až 40 kN	
Dovolené provozní teploty	0 až 70°C	
Vlastní frekvence	3 kHz	
Chyba měření	1%	
Citlivost	8 pC/N	
Spojovací kabel se zesilovačem	1687A5	

Zesilovač KISTLER 5007		
Měřicí rozsah	10 až 500 000 pC	 <p>Obr. P4-2 Zesilovač KISTLER 5007 [13]</p>
Citlivost	0,1 až 11 000 pC	
Přesnost pro nejcitlivější rozsah	3 %	
Přesnost pro ostatní rozsahy	1 %	

Sběrná karta DAQCARD-60262E		
Počet vstupů	16	 <p>Obr. P4-3 Sběrná karta DAQCARD-60262E [13]</p>
Počet výstupů	2	
Vzorkovací frekvence	500 kHz	

Příloha P5: Optický mikroskop MULTICHECK PC500

Optický mikroskop		
Horizontální provedení		
Možnosti měření	<ul style="list-style-type: none"> • opotřebení rotačních i nerotačních nástrojů • vzdálenost • úhly 	
Možnost nastavení nástroje pod úhlem		
Přesnost	0,001 μm	
Rozsah v ose X a Y	0 až 150 mm	
Vybavení	<ul style="list-style-type: none"> • software WMS • vyměnitelné objektivy se zvětšením 10x, 30x, 75x a 150x 	

Obr. P5-1 Optický mikroskop [13]

