

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T004 Strojírenská technologie - technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Obrábění oceli o vyšší tvrdosti kulovou frézou

Autor: **Bc. Zýka Stanislav**

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

Akademický rok 2012/2013

Zadání

Prohlášení o autorství

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

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, pouze s použitím odborné literatury, která je uvedena v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....
Podpis autora

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří mi pomohli při zpracování této diplomové práce, za cenné rady a připomínky:

- vedoucímu diplomové práce: Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph. D., ZČU v Plzni,
- odbornému konzultantovi: Ing. Pavlu Kožmínovi, Ph. D., HOFMEISTERs.r.o.,
- vedoucímu dílen: Ing. Josefu Skleničkovi, Ph. D., ZČU v Plzni,
- a obsluze frézovacího centra Oldovi Pavelkovi, ZČU v Plzni

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. Zýka	Jméno Stanislav		
STUDIJNÍ OBOR	Strojírenská technologie – technologie obrábění			
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zetek Ph.D.	Jméno Miroslav		
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Obrábění ocelí o vyšší tvrdosti kulovou frézou			

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

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	64	TEXTOVÁ ČÁST	46	GRAFICKÁ ČÁST	18
---------------	----	---------------------	----	--------------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Tato práce se zabývá problematikou obrábění ocelí o vysoké tvrdosti. V práci je také řešena problematika správného najíždění kulových fréz do řezu. Experimentální část se týká porovnání kulových fréz při obrábění kalené a popuštěné nástrojové oceli 19436 s tvrdostí 64HRC. Nástroje se od sebe liší různým složením slinutého karbidu a různou nadeponovanou vrstvou.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>slinutý karbid, kalená nástrojová ocel, tvrdost, povlak, kulová fréza, tvrdé obrábění</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Bc. Zýka	Name Stanislav	
FIELD OF STUDY	Machine industry technology – machining technology		
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	Machining of the steel with higher hardness by ball mill		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining technology	SUBMITTED IN	2013
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	64	TEXT PART	46	GRAPHICAL PART	18
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This thesis deals with the machining of the steels with high hardness. In this work is also soluted the issue of the correct approach ball mills to cut. The experimental part deals with the comparison ball mills for machining hardened and tempered tool steel 19436 with a hardness of 64HRC. The tools have different structure of cemented carbide and different coating.
KEY WORDS	cemented carbide, hardened tool steel, hardness, coating, ball mill, hard machining

Obsah

1. Úvod.....	9
2. Rozbor současného stavu	11
2.1 Oceli o vyšší tvrdosti.....	12
2.1.1 Vlastnosti nástrojové oceli 19 436.....	15
2.2 Obrábění ocelí o vyšší tvrdosti.....	16
2.2.1 Nástroje pro obrábění ocelí o vyšší tvrdosti.....	18
2.2.1.1 Stopkové frézy s kulovým zakončením	19
2.2.1.1.1 Hrubování pomocí nástrojů s vyměnitelnou kruhovou destičkou[9]	20
2.2.1.1.2 Obrábění vnitřních rohů[9].....	21
2.2.1.1.3 Nájezd a výjezd nástroje z řezu[9]	21
2.2.1.1.4 Využití víceosého frézování[9]	23
2.2.2 Deponování nástrojů pro obrábění ocelí o vyšší tvrdosti.....	24
2.2.2.1 Metody depozice tenkých vrstev.....	24
2.2.2.1.1 Fyzikální metoda depozice-PVD (PhysicalVaporDeposition)[4]	25
2.2.2.2 Typy tenkých otěruvzdorných vrstev.....	27
3. Návrh a realizace vlastních experimentů.....	30
3.1 Použité stroje a zařízení.....	30
3.1.1 Použité nástroje.....	30
3.1.2 Použité výrobní stroje a zařízení.....	32
3.1.2.1 CNC frézovací centrum MCV 750A	32
3.1.2.2 Hydraulický upínač	33
3.1.3 Použité měřicí přístroje	33
3.1.3.1 Optický mikroskop Multicheck PC 500	33
3.1.3.2 Optický mikroskop Infinite Focus G4	34
3.2 Návrh a výsledky experimentu.....	34
3.2.1 Pre – experiment	37
3.2.2 Krátkodobá zkouška podle A.S. Kondratova.....	38
3.2.2.1 Návrh krátkodobé zkoušky podle A.S. Kondratova	38
3.2.2.2 Naměřené hodnoty z krátkodobé zkoušky podle A.S. Kondratova	39
3.2.2.2.1 Vyhodnocení krátkodobé zkoušky	39
3.2.2.2.2 Stav břitu nástrojů po 19 minutách obrábění.....	43
3.2.3 Dlouhodobá zkouška.....	44

3.2.3.1	Návrh dlouhodobé zkoušky	44
3.2.3.2	Naměřené hodnoty z dlouhodobé zkoušky:	45
3.2.3.3	Vyhodnocení dlouhodobé zkoušky	46
3.2.3.3.1	Opotřebenění nástroje po 14 minutě obrábění a po dosažení limitního otupení	46
3.2.3.3.2	Kvalita obrobené plochy po dlouhodobé zkoušce trvanlivosti.....	48
4.	Technicko-ekonomické hodnocení	53
4.1	Ekonomické hodnocení	54
4.1.1	Ekonomické hodnocení krátkodobé zkoušky	55
4.1.1.1	Odebraný materiál při krátkodobé zkoušce	55
4.1.1.2	Náklady na obrábění	55
4.1.2	Ekonomické hodnocení dlouhodobé zkoušky	56
4.1.2.1	Odebraný materiál.....	56
4.1.2.2	Náklady na obrábění	57
4.1.3	Výsledky ekonomického hodnocení	57
5.	Závěr.....	58
	Seznam obrázků.....	60
	Seznam tabulek.....	62
	Seznam grafů.....	63
	Seznam literatury.....	64

Seznam použitých zkratk a symbolů

CBN		kubický nitrid bóru
SK		slinutý karbid
VBD		vyměnitelná břitová destička
HRC		označení tvrdosti podle Rockwella
HSC		vysokorychlostní obrábění
CVD		chemici vapor deposition; metoda depozice tenkých vrstev
PACVD		plasma asisted chemical vapor deposition; metoda depozice tenkých vrstev
PVD		physical vapor deposition; metoda depozice tenkých vrstev
NC		numerical control; číslicově řízený
D_{ef}	[mm]	efektivní průměr
v_{ef}	[m/min]	efektivní řezná rychlost
a_p	[mm]	hloubka řezu
a_e	[mm]	šířka řezu
f_z	[mm]	posuv na zub
v_c	[m/min]	řezná rychlost
D_c	[mm]	průměr nástroje
n	[ot/min]	otáčky
z	[-]	počet zubů
γ	[°]	úhel hřbetu
β	[°]	úhel břitu
α	[°]	úhel čela
ω_s	[°]	úhel stoupání šroubovice
r_N	[μ m]	poloměr zaoblení nástroje
K	[-]	K-faktor, parametr hodnocení mikrogeometrie břitu řezného nástroje
R_a	[μ m]	hodnota drsnosti
R_z	[μ m]	hodnota drsnosti
S_a	[μ m]	hodnota plošné drsnosti
S_q	[μ m]	hodnota plošné drsnosti
S_z	[μ m]	hodnota plošné drsnosti
L_c	[μ m]	vlnová délka
VB	[μ m]	rozměr opotřebení hřbetu břitu
T	[min]	trvanlivost
VB_{N1}	[μ m]	rozměr opotřebení hřbetu 1. břitu
VB_{N2}	[μ m]	rozměr opotřebení hřbetu 2. břitu
$VB_{Nstř}$	[μ m]	průměrná hodnota opotřebení hřbetu břitu
t	[min]	čas obrábění
I_{ekv}	[μ m/min]	ekvivalentní hodnota intenzity opotřebení
v_{ekv}	[m/min]	ekvivalentní řezná rychlost
m	[-]	exponent vyjadřující směrnici přímky k ose V_c
C_{vT}	[-]	taylorova konstanta
V_{15}	[m/min]	řezná rychlost pro trvanlivost břitu 15 minut
Q_t	[cm ³]	odebrané množství materiálu
C_N	[Kč]	cena nástroje
N_{cm}^3	[Kč/cm ³]	náklady na odebrání 1cm ³ materiálu
A_{c1}	[°C]	teplota překrytalizace

1. Úvod

V dnešní době se zvětšuje oblast použití tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů, které v minulosti byly používány výhradně v leteckém průmyslu nebo pro využití v kosmonautice. S tímto růstem se musí zvyšovat i kvalita nástrojů pro obrábění těchto materiálů. Od použití rychlořezné oceli, slinutých karbidů, cermetů, řezné keramiky, CNB až po použití syntetických diamantů. S rostoucím vývojem materiálu nástrojů jde současně i vývoj tenkých vrstev, které jsou deponovány na nástroj.

Volba vhodného nástroje s vhodným povlakem je pro obrábění tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů velmi důležitá, protože při obrábění vzniká velké množství problémů. Mezi nejčastější problémy patří velmi rychlé opotřebení nástroje, tvorba trhlin a špatná jakost obrobeneho povrchu. Pro správný výběr materiálu nástroje je nutné uvažovat vznik vysokých teplot při obrábění, vysoké mechanické zatížení břitu. Vhodně zvolený materiál nástroje by měl splňovat tyto základní požadavky:

- odolnost proti abrazi
- odolnost proti difúzi
- chemickou stabilitu
- tvrdost i za teplot obrábění
- stabilitu proti teplotním rázům
- pevnost v tlaku a ohybu
- houževnatost
- tepelná vodivost

Trvanlivost nástroje lze hodnotit podle ekonomického a technologického hlediska. Ekonomické hledisko má za cíl dosáhnout co nejmenších výrobních nákladů na obrobek. Technologické hledisko znamená, že břit je považován za otupený, pokud je nástroj v takovém stavu, že není schopný obrábět povrch obrobku s požadovanou jakostí povrchu nebo pokud by v krátkém čase nastalo jeho porušení.

Pro trvanlivost a spolehlivost nástroje je také důležitá vhodně zvolená geometrie břitu vzhledem k obráběnému materiálu a vhodně zvolené řezné podmínky.

Pro výrobce nástrojů je důležitý výběr nástroje s nejdelší trvanlivostí a nejnižšími náklady na výrobu nástroje pro obrábění dané skupiny materiálu. Pro výběr vhodného nástroje a následného spuštění výroby je velmi důležité experimentální zjištění řezivosti nástrojů.

Řezivostí nástrojů se označují takové vlastnosti, které ovlivňují velikost optimálního úběru (např. tvrdost v závislosti na teplotě, afinita k materiálu obrobku, pevnost v ohybu, odolnost proti teplotním šokům, tepelná vodivost, houževnatost).

Řezivost nástrojů je buď relativní, nebo absolutní. Relativní řezivost se vyhodnocuje porovnáním minimálně dvou nástrojů, které mohou být porovnány z hledisek obrábění materiálů stejné skupiny obrobitelnosti.

Cílem této diplomové práce je porovnání kulových fréz ze slinutého karbidu o různém složení, struktuře a různé nadeponované vrstvě. Tyto nástroje se budou porovnávat s etalonovým nástrojem z hlediska trvanlivosti nástroje a jakosti obrobeného povrchu. Obráběným materiálem bude kalená a popuštěná nástrojová ocel 19 436 o tvrdosti 64HRC \pm 1HRC.

2. Rozbor současného stavu

Dříve se tvrdé a těžkoobrobitelné materiály nechaly obrobit pouze elektrojiskrovým obráběním nebo broušením. Dnešním trendem je nahradit drahé a neproduktivní operace broušení a elektrojiskrové obrábění produktivním frézováním. Tímto směrem lze dosáhnout vysoké produktivity. Nejčastěji se materiál obrábí v zušlechtěném stavu a poté je materiál zakalen a dokončen. Z tohoto důvodu k obrábění tvrdých materiálů dochází zejména při operacích dokončování. Protože obrábění materiálu o vysoké tvrdosti charakterizují velké řezné síly a vysoké teploty, musí materiál nástroje vykazovat vysokou odolnost proti plastické deformaci, chemickou stabilitu a odolnost proti abrazi a oxidaci. Vysoké teploty v místě řezu snižují síly vznikající při obrábění, proto při obrábění příliš nízkými řeznými rychlostmi se zvyšuje řezná síla, která může způsobit vylomení břitu. Pro obrábění tvrdých ocelových materiálů se často také používá kubický nitrid bóru.

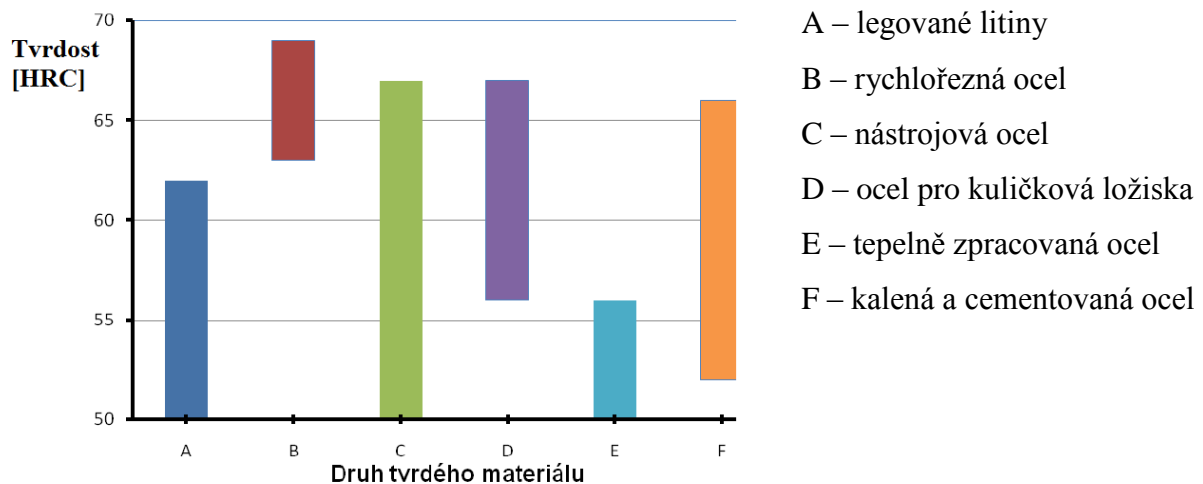
Při obrábění tvrdých ocelových materiálů slinutým karbidem musí být zabezpečen vhodný odvod třísek, protože jsou velmi tvrdé a mohou snadno poškodit obráběný povrch. Velmi důležitý požadavek je i minimalizace vibrací. Tohoto můžeme docílit vhodným naprogramováním dráhy nástroje a pozvolným najetím do řezu[7]. Pokud jsou obráběny kalené materiály nad 60HRC, tak trvanlivost nástroje velmi závisí na správné geometrii nástroje, nadeponované tenké vrstvě a stanovených řezných podmínkách.

Výrobci nástrojů standardně garantují obrábění materiálů do hodnoty tvrdosti 60 - 63HRC. Firma KORLOY však u jedné řady nástrojů ze slinutého karbidu garantuje obrábění kalených ocelí až do 70HRC díky nové geometrii břitu umožňující jeho zpevnění a nově vyvinuté tenké vrstvě odolného vůči oxidaci za vysokých teplot.

Oceli o vyšší tvrdosti lze tedy obrábět nástrojem ze slinutého karbidu. Pokud se budeme řídit rozdělením SK podle normy ISO, tak pro obrábění tvrdých nástrojů lze použít SK skupiny H. Pro tuto skupinu platí, že jsou vhodné pro obrábění kalených materiálů o tvrdosti větší než 50HRC. Proto je možno považovat materiály nad 50HRC jako materiály o vyšší tvrdosti.

2.1 Oceli o vyšší tvrdosti

Oceli o vyšší tvrdosti jsou v současné době velmi využívanou skupinou materiálu v různých odvětvích průmyslu. Pomocí správné metody tepelného zpracování lze dosáhnout tvrdosti nad 50HRC u různých tříd oceli, ať už třídy 15, 16 nebo 17. Pokud je však požadavek na velmi vysokou tvrdost materiálu (např. pro výrobu forem), jsou nejčastěji používány oceli třídy 19 tedy nástrojové oceli.



Obr.2.1a Rozsah tvrdosti pro hlavní druhy tvrdých materiálů[13]

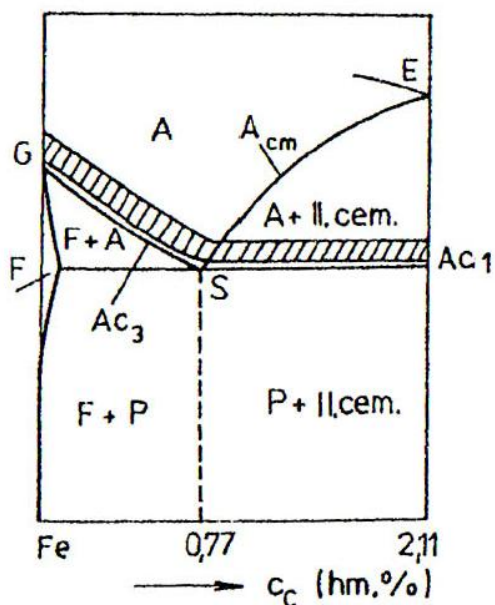
Oceli o vyšší tvrdosti získávají svoji tvrdost ve většině případů tepelným zpracováním tedy kalením. Po kalení vznikne martenzitická struktura. Tato struktura je velmi tvrdá ovšem obsahuje také vysoké vnitřní pnutí a proto po kalení tedy následuje popouštění. Popouštění je takový proces, kdy se ocel zahřeje pod teplotu A_{c1} a na této teplotě se udrží po předem stanovenou dobu.

Kalené oceli

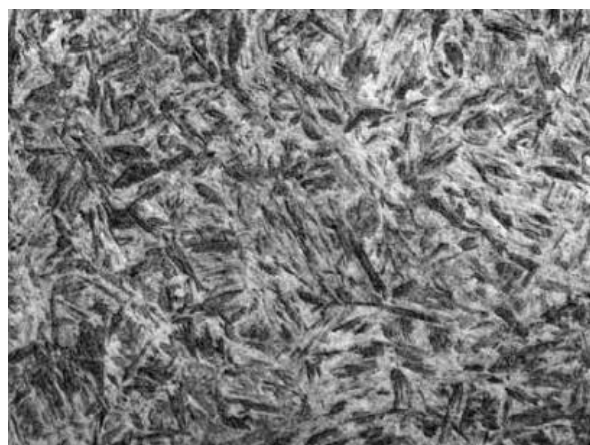
Kalené oceli jsou velmi používané v případech, kdy je potřeba materiál s vysokou tvrdostí, pevností a odolností proti opotřebení.

Kalitelnost oceli je schopnost oceli dosáhnout pomocí kalení nerovnovážného stavu. Kalitelnost oceli je dána zejména chemickým složením oceli, podmínkami austenitizace, tvarem a velikostí kaleného předmětu a intenzitou ochlazování[15].

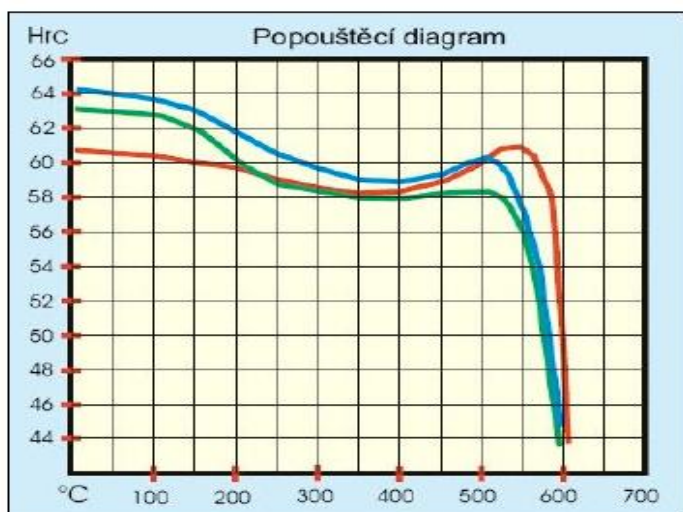
Tvrdoost oceli po kalení je závislá na teplotě kalení a obsahu zbytkového austenitu. Tento obsah lze ovlivnit množstvím přísadových prvků, velikostí austenitického zrna a podmínkami ochlazování[15]. Kromě obsahu zbytkového austenitu ovlivňuje výslednou tvrdoost popouštěcí teplota (viz obr.2.1d).



Obr.2.1c Teploty kalení ocelí[16]



Obr.2.1b Struktura martenzitu[16]

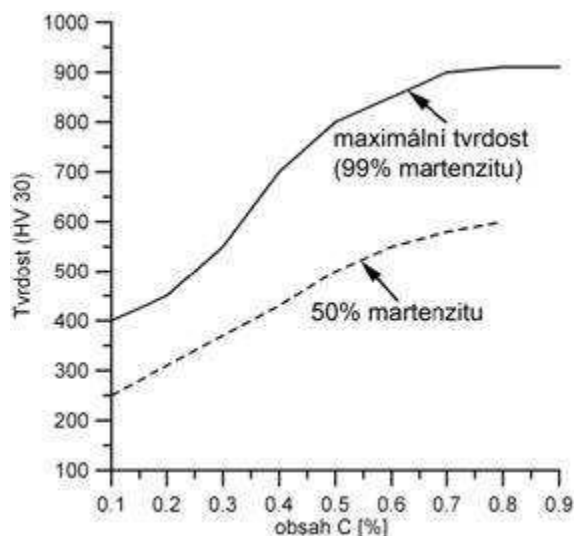


100 °C = 64 +/- 1HRc
200 °C = 61 +/- 1HRc
300 °C = 59 +/- 1HRc
400 °C = 58 +/- 1HRc
500 °C = 58 +/- 1HRc

Kalící teploty:
zelená při 980 °C
modrá při 1020 °C
červená při 1050 °C

Obr.2.1d Závislost tvrdoosti oceli 19573 v závislosti na popouštěcí teplotě[16]

Protože kalená ocel není tvořena pouze martenzitem, tak se považuje za zakalenou ocel, taková ocel, která obsahuje alespoň 50% martenzitu.



Obr.2.1e Závislost tvrdosti oceli na obsahu uhlíku[14]

Oceli o vyšší tvrdosti, které mají největší rozsah tvrdosti (cca 50 – 68HRC) jsou nástrojové oceli. Vlastnosti nástrojových ocelí velice záleží na chemickém složení a následném tepelném zpracování.

19 XYZ. AB

Jakostní skupina
oceli

↙

↘

Stupeň přetváření
Stav ocele (druh tepelného zpracování)

		X	A	B
0		0,3-0,6%C podeutektoidní	Nezpracované	Nezpracované
1	Nelegované	0,5 – 1,1%C	Normal. žiháno	Lehce válcováno
2		1,0 – 1,5% nadeutektoidní	Žiháno	1/4 tvrdý
3		Mn(+V,Cr,W,Si),V	Žiháno na měkko	1/2 tvrdý
4	Legované	Cr,Cr(+V,Si),Cr-Mn-V	Kalení	3/4 tvrdý
5		Cr-Mn,Cr-Mo(+V,Mn,Si)	Normal. žiháno a popuštěno	4/4 tvrdý
6		Ni(+V,Cr)	Zušl. na dolní pevnost	5/6 tvrdý
7		W,W-Cr(+V,Ni,Si,Co)	Zušl. na střední pevnost	Neobsazeno
8		Rychlořezné oceli RO	Zušl. na horní pevnost	Spec. zpevněno
9		Lité	Zvláštní TZ	Dle zvl. ujednání

Obr.2.1f Rozdělení a značení nástrojových ocelí[16]

Pro výrobu velmi namáhaných forem nebo forem s dlouhou životností pro tváření plastů se nejvíce používá kalená a popuštěná nástrojová ocel 19 436.

2.1.1 Vlastnosti nástrojové oceli 19 436

Značení ocele dle norem:

W. Nr.: 1.2080
DIN: X210Cr12
ČSN: 19 436

Charakteristika oceli[2]:

Vysoce legovaná chromová ocel s velkou prokalitelností. Tato ocel se vyznačuje zvláště vysokou odolností proti opotřeбенí jak kovovými tak minerálními látkami. Ocel má dobrou řezivost a velmi vysokou pevnost v tlaku, ovšem má nízkou houževnatost zejména v příčném stavu a vyskytuje se u ní výrazná karbidická řádkovitost. Ocel vykazuje dobrou stálost rozměrů při tepelném zpracování. Nevýhodou této oceli je její obtížné broušení, tváření a snížená obrobiteľnosť.

Tato ocel se používá nejčastěji v zakaleném a popuštěném stavu. V tomto stavu se vyznačuje velkou otěruvzdorností a tvrdostí. Tvrdost závisí zejména na přesném složení materiálu, způsobu a teplotě kalení a popouštěcí teplotě. Obrobiteľnosť této oceli se pohybuje okolo 9b.

Teplota[°C]	930-960	950-980	1040-1080
tvrdost[HRC]	61	60	57

Tab.2.1.1a Závislost tvrdosti na kalící teplotě

Teplota[°C]	100	150	200	250	300
tvrdost[HRC]	64	63	62	60	57

Tab.2.1.1b Závislost tvrdosti na popouštěcí teplotě

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	HRC min
1,8-2,05	0,2-0,45	0,2-0,45	max 0,03	max0,035	11-12,5	max 0,5	61

Tab.2.1.1c Chemické složení oceli 19 436

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	HRC min
1,9-2,2	0,15-0,45	0,1-0,4	max 0,03	max0,03	11-12,5	max 0,5	60

Tab.2.1.1d Chemické složení oceli DIN X210Cr12

Použití oceli 19 436:

- Řezné nástroje
 - Nástroje na obrábění měkkých kovových materiálů menšími rychlostmi (soustružnické nože, výhrubníky, závitníky)
- Nástroje pro stříhání a tváření za studena
 - Velmi namáhané nástroje s velkou výkonností a životností pro stříhání a děrování kovových materiálů malých tlouštěk (např.: transformátorové plechy)
 - Střížnice pro přesné stříhání, nože strojních nůžek
 - Velmi namáhané, tvarově jednoduché nástroje s velkou odolností proti opotřebení při menších nárocích na houževnatost (např.: tvarovací lisovadla, razidla, protlačovadla, tlačné trny).
- Formy
 - Malé, velmi namáhané formy nebo díly forem s velkou životností pro tváření plastů
 - Lisování kovových i nekovových prášků, porcelánu, keramických materiálů i skla při velkých nárocích na odolnost proti opotřebení a tlakovému namáhání.
- Nástroje pro drcení a mletí
 - Kladiva a čelisti drtičů pro jemné drcení a mletí různých materiálů při velkých nárocích proti opotřebení.

2.2 Obrábění ocelí o vyšší tvrdosti

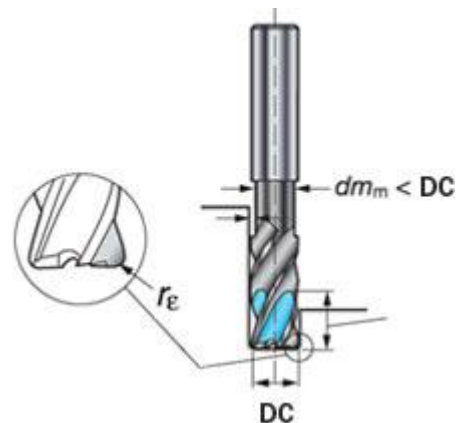
Obrábění materiálů o vyšší tvrdosti s sebou nese celou řadu omezujících podmínek, které musí být splněny, aby docházelo k produktivnímu obrábění. Obrábění materiálů s vysokou tvrdostí se zpravidla realizuje HSC obráběním, protože při HSC obrábění lze docílit vysoké teploty blízké teplotě tavení obráběného materiálu. Tímto lze dosáhnout měknutí obráběného materiálu před břitem nástroje a tím lze velmi snížit silové zatížení stroje a nástroje. Důležité je, aby při obrábění tvarových ploch kulovou nebo toroidní frézou byl stanoven správně efektivní průměr frézy. Pokud by byl efektivní průměr stanoven špatně, nemuselo by být dosaženo HSC obrábění, což by způsobilo vysoké silové namáhání nástroje s následnou destrukcí nástroje. [11]

Při obrábění ocelí o vyšší tvrdosti vznikají velmi tvrdé třísky, které by mohly poškodit obrobek či dokonce nástroj, proto je velmi důležité zabezpečit správný odchod třísek. Správný odchod třísek je možno zabezpečit pomocí stlačeného vzduchu vedeným vnitřní dutinou vřetena a následně směřovaným k řezným břitům.

Při obrábění ocelí o vyšší tvrdosti se nedoporučuje použití chladicí emulze. Použitím chlazení dochází k tepelným šokům nástroje. Tyto tepelné šoky mohou zapříčinit mikrotrhliny ve SK, přičemž tyto mikrotrhliny mohou vést až k destrukci nástroje (vylomení břitů). Tato destrukce nástroje by mohla znamenat i ohrožení obsluhy z důvodu vysokých otáček, které jsou používány při HSC obrábění.

Důležitým pojmem je také pojem stabilita řezného procesu. Stabilitu lze velmi ovlivnit konstrukcí nástroje, například:

- Konstrukčním provedením s proměnným tvarem drážky pro odvod třísek
- Proměnnou hloubkou drážky a nerovnoměrnou zubovou roztečí se zabezpečí snadný odvod třísky a omezí se tím výskyt vibrací
- Přesazeným průměrem se zlepší přístup do místa řezu
- Proměnným tvarem drážky se zajistí maximální stabilita při náročných frézovacích operacích
- Konstrukční provedení s proměnným úhlem stoupání šroubovice



Obr.2.2 Konstrukční provedení nástroje[17]

S proměnným úhlem stoupání šroubovice dochází k zvýšení stability nástroje, což se projeví snížením výskytu vibrací. Výsledkem je vysoká kvalita obrobek a zvýšení životnosti nástroje.

Proměnný úhel stoupání šroubovice dovoluje:

- Použití větší radiální a axiální hloubky řezu
- Omezení vylamování a vyštípávání ostří
- Větší rozměrovou přesnost obrobku

Obecně pro obrábění ocelí o vyšší tvrdosti musí být splněny tyto podmínky:

- Řezné geometrie nástroje nejvyšší kvality
- Speciálně vybraný mikrozrný tvrdokov
- Tuhé upínací přípravky nejvyšší přesnosti
- Technologicky správné řezné podmínky
- Výběr povlaků odolných vůči vysoké teplotě obrábění a otěru

2.2.1 Nástroje pro obrábění ocelí o vyšší tvrdosti

Pro obrábění ocelí o vyšší tvrdosti lze použít většinu řezných materiálů vyjma rychlořezné oceli a diamantu. Při použití rychlořezné oceli by nebyla splněna podmínka tvrdosti nástroje. Tato podmínka stanovuje, že řezný materiál musí být alespoň o 5HRC tvrdší než obráběný materiál. Diamant lze vyřadit díky vysoké afinitě uhlíku k železu. Proto lze tedy v závislosti na tvrdosti obráběného materiálu použít nástroj ze slinutého karbidu, keramiky nebo z CBN.

Za největší tvrdost materiálu, který může být obráběn nástrojem ze slinutého karbidu, se považuje hodnota 70HRC z důvodu, že tvrdost SK je cca 75HRC. Nástroje ze slinutého karbidu jsou ovšem mnohem levnější než nástroje z keramiky či CNB. Při obrábění dutin s velkým vyložení nástroje vznikají vibrace. SK díky své vyšší houževnatosti než keramické nástroje a nástroje z CBN lépe odolávají těmto vibracím. Vznik vibrací také velmi ovlivňuje správné naprogramování drah nástroje – tzv. strategii obrábění. Pokud jsou dráhy nástroje naprogramovány správně s minimálním počtem vyjíždění a najíždění do řezu a rovnoměrným přídavkem na obrábění, tak lze velmi omezit vznikající vibrace. Proto lze konstatovat, že pokud jsou dráhy naprogramovány správně, je výhodné použití keramických nástrojů nebo nástrojů z CBN. Pokud dráhy nástroje nejsou ideálně naprogramované, je lepší využít nástroje ze SK.

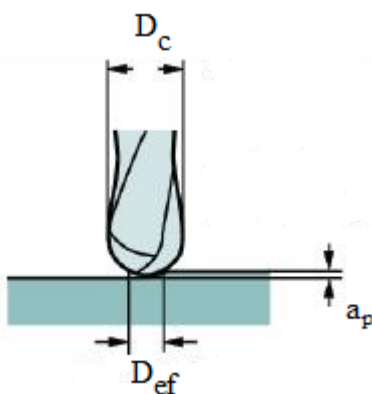
Kromě správné volby materiálu nástroje je také velmi důležitá vhodná geometrie nástroje. Obecně platí, že čím vyšší tvrdost obráběného materiálu, tím by měla být geometrie nástroje negativnější. Je to dáno tím, že k prvnímu kontaktu mezi nástrojem a obrobkem dojde mimo řeznou hranu nástroje a tím se na této hraně sníží tlak. Proto nástroj s negativní geometrií má delší životnost než nástroj s pozitivní geometrií.

Při obrábění dutin je věnována pozornost operacím dokončování, protože hrubovací operace jsou umísťovány spíše před samotný proces tepelného zpracování. Při dokončovacích operacích jsou nejčastěji obráběny tvarové plochy a proto jsou zde nejčastěji využívány kulové či torusové stopkové monolitní nástroje nebo nástroje s vyměnitelnou kruhovou destičkou.

2.2.1.1 Stopkové frézy s kulovým zakončením

S vývojem obráběcích strojů, zejména pak s rozvojem pětiosých strojů, se v jistých případech snížila poptávka po stopkových frézách s kulovým zakončením (kulové frézy), ovšem současnost vyžaduje obrábění i velmi tvarově složitých součástí a proto výroba kulových nástrojů má pořád velmi vysoký význam.

Mezi hlavní nevýhody kulových fréz patří proměnná řezná rychlost v závislosti na efektivním průměru D_{ef} . Na špičce kulové frézy se vyskytuje nulová řezná rychlost, proto je snaha se při obrábění vyhnout tomuto problematickému místu. Při obrábění složitých tvarů nelze vždy tomuto problému předejít, a proto výrobci nástrojů musí toto místo zohlednit při konstrukci nástroje.



U kulových nástrojů se spíše než pojem řezná rychlost používá pojem efektivní řezná rychlost. Tato rychlost je vztažená k největšímu průměru nástroje, který je v řezu. Efektivní řezná rychlost se vypočítá z efektivního průměru:

$$D_{ef} = 2 \cdot \sqrt{a_p \cdot (D_c - a_p)} [mm]$$

$$v_{ef} = \frac{\pi \cdot n \cdot D_{ef}}{1000} [m / min]$$

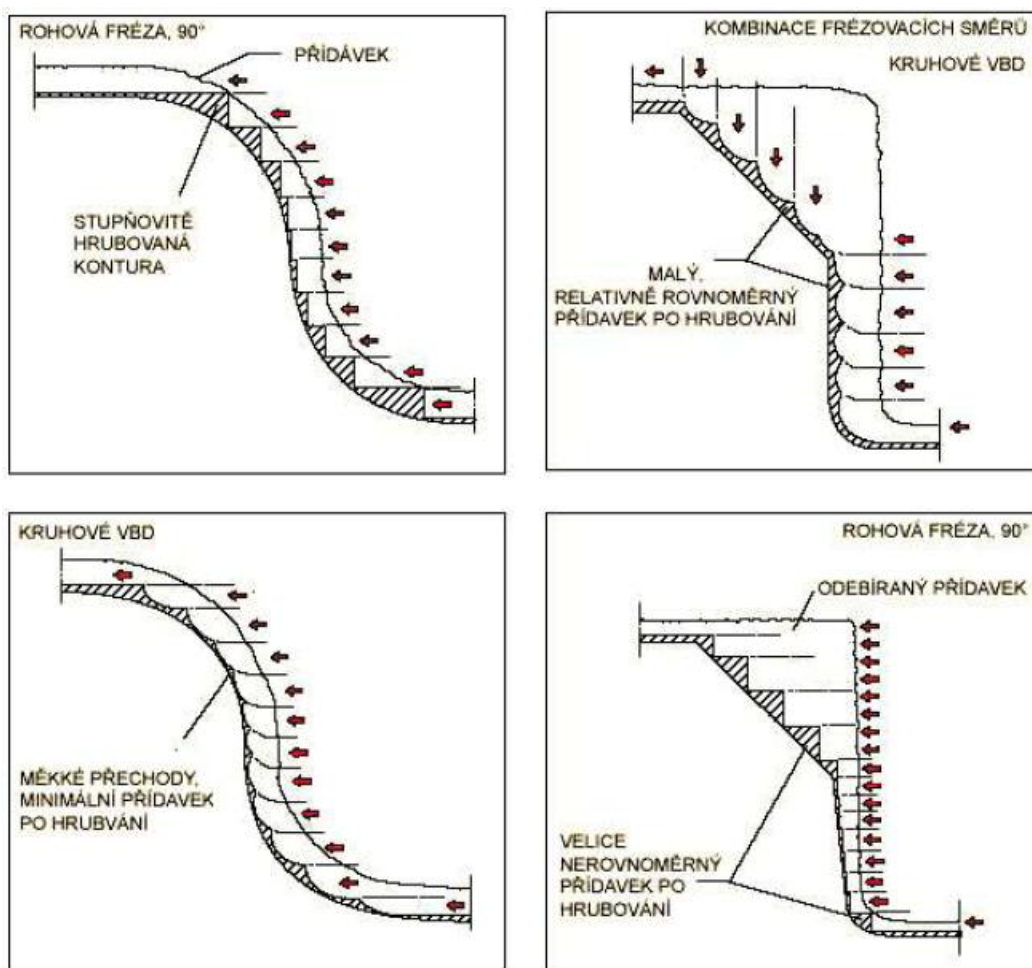
Obr.2.2.1.1 Efektivní řezná rychlost[17]

2.2.1.1.1 Hrubování pomocí nástrojů s vyměnitelnou kruhovou destičkou[9]

Základním cílem hrubování je rychlé odebrání co největšího objemu obráběného materiálu se zachováním rovnoměrného přídavku pro dokončování. Použitím nástrojů s kruhovými VBD nebo kulovými frézami v režimu tříosého obrábění lze dosáhnout větší geometrické aproximace k výslednému tvaru obrobku, než při použití válcových fréz.

Výhodou fréz s kruhovou destičkou je obrábění tvarových ploch v kombinaci s rovinným frézováním.

Nevýhodou je složitější programování dráhy nástroje.



Obr.2.2.1.1.1 Hrubování nástroji s kruhovou destičkou[10]

2.2.1.1.2 Obrábění vnitřních rohů[9]

Nejsnadnější obrobení rohů je lineárním pohybem nástroje, ovšem při takovém způsobu obrábění dochází k nerovnoměrnému záběru nástroje a k vzniku rázů. Při použití nástroje, který má stejný poloměr jako je poloměr obráběné součásti, je v tomto místě vysoká teplota a řezné síly z důvodu velké styčné plochy mezi nástrojem a obrobkem (velký úhel opásání). Navíc v tomto místě dochází k zastavení nástroje v jedné ose a nastává pohyb v ose další. Tyto příčiny mají za následek vznikající vibrace. Tyto vibrace mohou mít v krajních případech za následek i destrukci nástroje. Aby k tomuto stavu nedocházelo, používají se nástroje, jejichž poloměr je menší než vnitřní poloměr tvaru obráběné součásti. K tomu je zapotřebí využít kruhovou interpolaci pohybu nástroje a tím zrovnoměrnit záběrové podmínky nástroje.

2.2.1.1.3 Nájezd a výjezd nástroje z řezu[9]

Velký problém při obrábění kulovými nástroji tvoří také nájezdy do řezu. Nástroj by se měl pokud možno co nejméně zavrtávat do materiálu, protože při zavrtávání je v řezu špička nástroje a vyskytuje se zde velký úhel opásání a tím i vysoké mechanické a tepelné zatížení nástroje. Mnohem vhodnější je nájezd do řezu například z boku materiálu či po kružnici.

Obvodové najíždění do řezu:

Vždy, když nástroj vstupuje do řezu, je vystavován skokovému zatížení. Toto zatížení může být tak vysoké, že dojde k destrukci břitu. Toto zatížení lze snížit vhodným místem, kde dojde k prvnímu styku nástroje s obrobkem. Nejvhodnějším místem je střed břitu nástroje.

Obvodové vyjíždění z řezu:

Výjezd nástroje z řezu je taktéž velmi důležitý. Při vyjíždění nástroje z řezu vznikají tlakové, tahové nebo dokonce ohybové namáhání. Například břitová destička ze slinutého karbidu je přizpůsobena na tlakové namáhání, ovšem tahové nebo ohybové namáhání může mít za následek její destrukci.

Čelní najíždění do řezu:

Při frézování dutin nelze uskutečnit nájezd z boku. Lze realizovat pouze příjezd z čela.

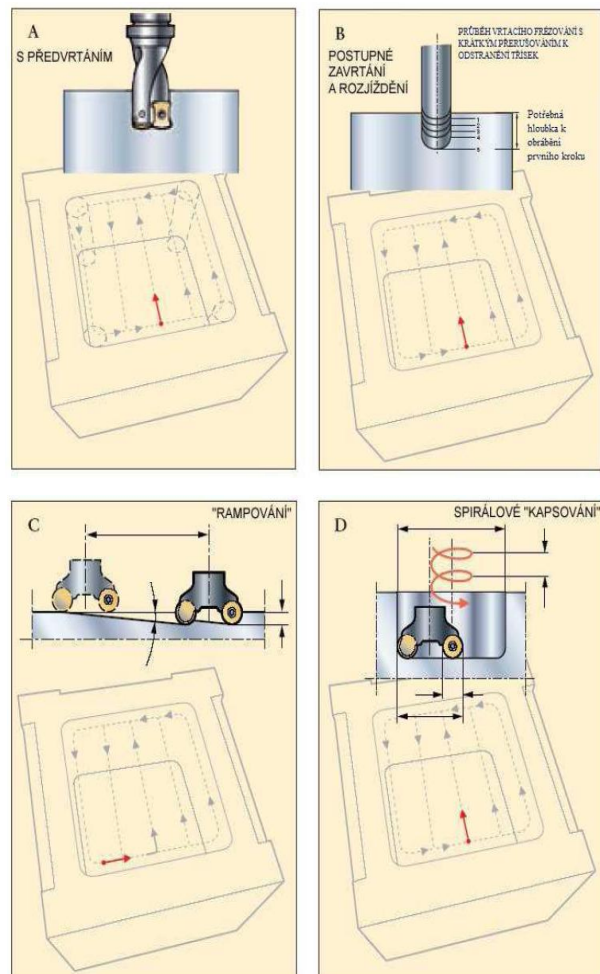
A: Nejjednodušší metoda spočívá v předvrtání otvoru frézou, která je konstrukčně uspořádána na vrtání otvorů. Tento otvor se vyvrtá do požadované hloubky dutiny a poté dalším nástrojem se najede do otvoru a následně se otvor zvětší do požadovaného tvaru.

B: Dalším způsobem je zavrtání nástroje do určité hloubky a postupné rozjíždění otvoru.

Při této metodě je ovšem nevýhodou špatný odvod třísek. Je nutnost z řezu vyjíždět a znovu zajíždět tak, aby došlo k přerušení třísky a jejího odvedení z místa řezu.

C: V současné době je nejlepší metoda tzv. rampování. V podstatě se jedná o lineární šikmé najíždění na plnou hloubku řezu. Startovací bod je volen vně nad obráběnou tvarovou plochu, nejlepší je startovací bod volit tam, kde je možnost zvolit co největší radiální hodnotu nájezdu.

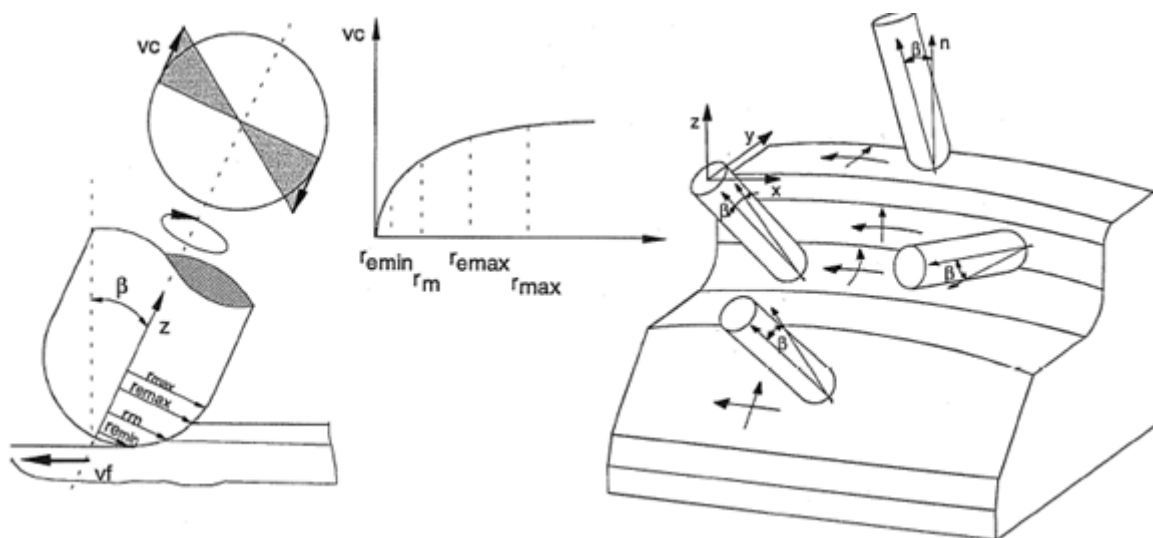
D: Jedná se o rampování s kruhovou interpolací. Tato metoda je ještě výhodnější než lineární rampování. Při této metodě nástroj zajíždí na hloubku řezu nikoliv lineárně, ale pomocí kruhové interpolace.



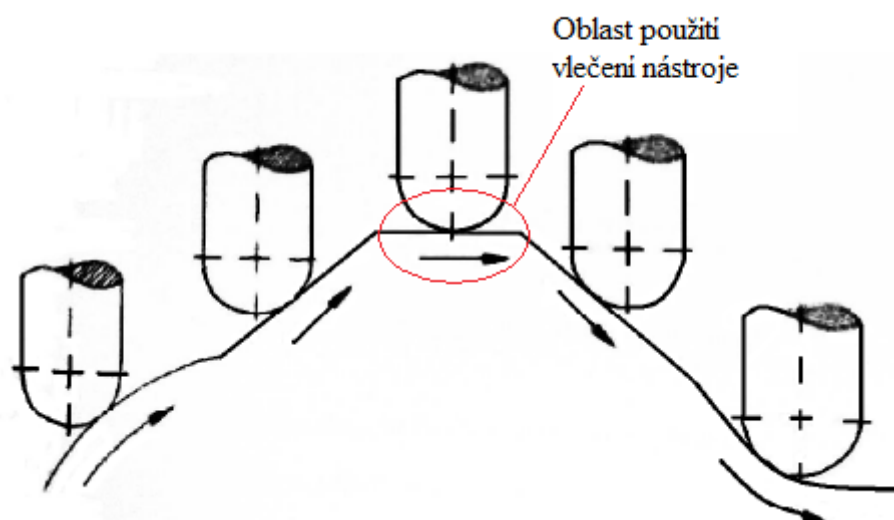
Obr.2.2.1.1.3 Způsoby najíždění nástroje do řezu[10]

2.2.1.1.4 Využití víceosého frézování[9]

Jak již bylo zmíněno, největší problém při obrábění kulovými nástroji spočívá v nulové řezné rychlosti v místě osy nástroje. Při použití tříosého stroje existuje způsob, jak se nechá předcházet zmíněnému problému – za použití přípravku, kdy svírající úhel mezi osou nástroje a obráběnou plochou není 90° . Při použití víceosého stroje lze nástroj vyklonit a tím zamezit obrábění jeho středem. Vzhledem k výzkumům bylo dokázáno, že nejvýhodnější naklonění nástroje vzhledem k přesnosti a drsnosti obráběného povrchu a opotřebení břitu je mezi $10 - 20^\circ$ do směru posuvu.[9, 11]



Obr.2.2.1.1.4a Vlečení nástroje[9]



Obr.2.2.1.1.4b Příklad použití vlečení nástroje[11]

2.2.2 Deponování nástrojů pro obrábění ocelí o vyšší tvrdosti

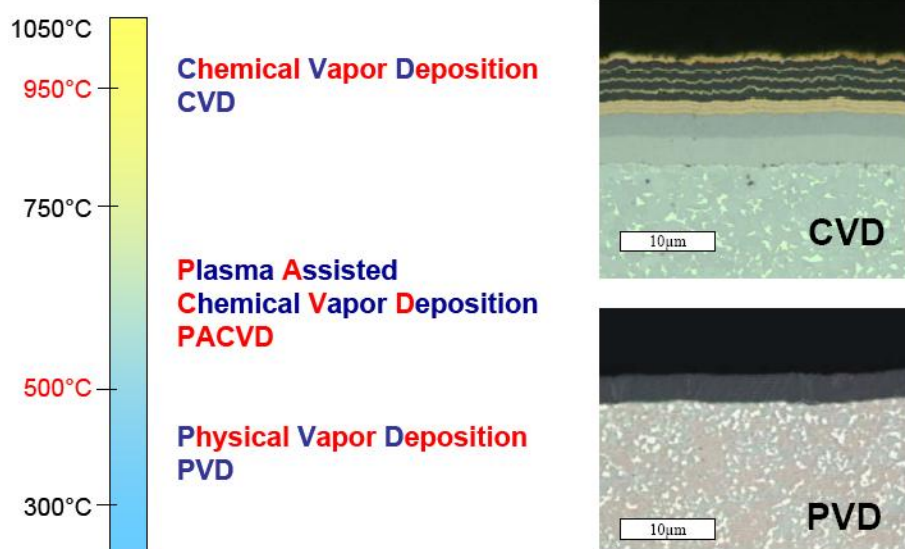
První deponované nástroje ze slinutého karbidu pro obrábění vyrobila firma Sandvik Coromant v roce 1969. Jednalo se o materiál GC125, deponovaný vrstvou TiC o tloušťce vrstvy 4 - 5 μm . S malým časovým odstupem následovaly tenké vrstvy typu TiN a TiCN, vrstvy Al_2O_3 přišly na trh v polovině 70. let. Otěruvzdorné vrstvy byly vytvářeny na podkladech z běžných SK metodou CVD, jako jedno- i vícevrstvé. Tenké vrstvy PVD se jako otěruvzdorné na břitových destičkách ze slinutých karbidů začaly používat na začátku 80. let. Nejužívanější vrstvou PVD byla jednovrstvá TiN.[1]

Vývoj deponovaných slinutých karbidů lze rozdělit do následujících čtyř generací:

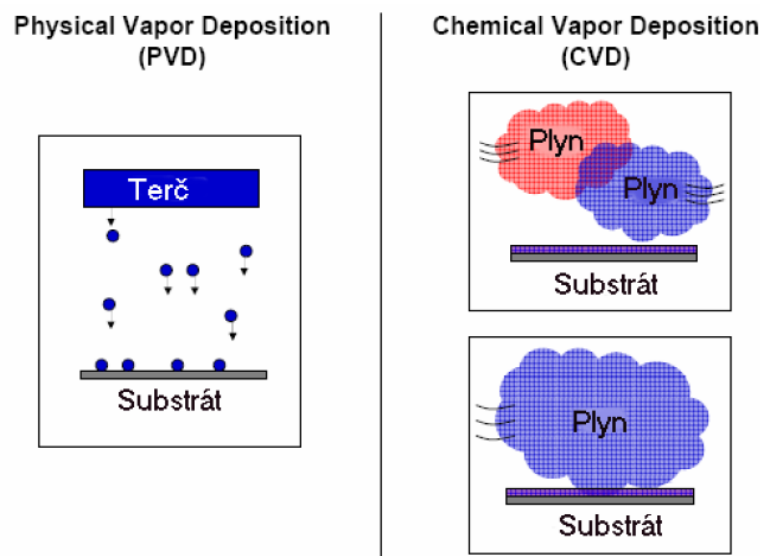
- 1. generace:** jednovrstvá tenká vrstva (téměř výhradně TiC) s tloušťkou až 7 μm .
- 2. generace:** jednovrstvá tenká vrstva (TiC, TiCN, TiN) s tloušťkou až 13 μm .
- 3. generace:** vícevrstvá tenká vrstva (dvě až tři, případně i více vrstev) s ostře ohraničenými přechody mezi jednotlivými vrstvami. Nejčastěji bývají jednotlivé vrstvy řazeny v tomto pořadí od podkladu k povrchu: TiC- Al_2O_3 , TiC-TiN, TiC-TiCN-TiN, TiC- Al_2O_3 -TiN, TiCN- Al_2O_3 -TiN.
- 4. generace:** speciální vícevrstvá tenká vrstva-velmi často i více než 10 vrstev a mezivrstev, s méně či více výraznými přechody mezi jednotlivými vrstvami. Používají se stejné materiály vrstev jako u 3. generace.

2.2.2.1 Metody depozice tenkých vrstev

Podle principu se depozice dělí metody do tří základních skupin: PVD, CVD a PACVD.



Obr.2.2.2.1a Porovnání teplot při PVD, PACVD a CVD metodách deponování [16]



Obr.2.2.2.1b Princip PVD a CVD metody deponování[16]

PVD metodou lze vytvořit velmi ostrou hranu nástroje díky tomu, že lze touto metodou nanést velmi malou vrstvu (nedochází k zaoblení břitu). Touto metodou lze vytvořit vrstvy s vysokou odolností proti otěru. Uvnitř povrchu PVD vrstvy vzniká tlakové pnutí a díky němu jsou tyto vrstvy odolné proti tepelným hřebenovým trhlinám. Touto metodou lze vytvořit také mnohvrstvé kompletní vrstvy s velkým počtem vrstev v řádech nanometrů. Tyto vrstvy mohou velmi zvyšovat tvrdost.

Tyto a další výhody znamenají, že pro depozici nástrojů tenkými vrstvami pro frézování ocelí o vyšší tvrdosti je výhodnější použít metodu PVD než metodu CVD.

2.2.2.1.1 Fyzikální metoda depozice-PVD (Physical Vapor Deposition)[4]

Pomocí této metody lze nanášet vrstvy různého složení a výborných mechanických vlastností a to i na tepelně zušlechtnuté materiály. Nanášená vrstva vzniká z plynného skupenství za velmi nízkého tlaku (0,01 -10 Pa). Nanášená látka se přivádí do plynného stavu fyzikálním procesem (odpařováním nebo rozprašováním) ve vakuové komoře v průběhu depozice. Rozprašování je proces, při kterém dochází k uvolnění atomu z povrchu nanášené látky dopadem urychleného iontu. Při iontovém plátování dopadají ionty i na povlakovaný předmět. Energie těchto iontů je určena napětím přivedeným na povlakovaný předmět. Tímto lze připravit povrch před nanášením vrstvy a odstranit hůře vázané atomy z rostoucí vrstvy jejich odprášením. Dopad iontů během nanášení výrazně ovlivňuje vlastnosti výsledné vrstvy (například tvrdost, vnitřní pnutí, adhezi k substrátu) a rovněž dovoluje vznik sloučenin při

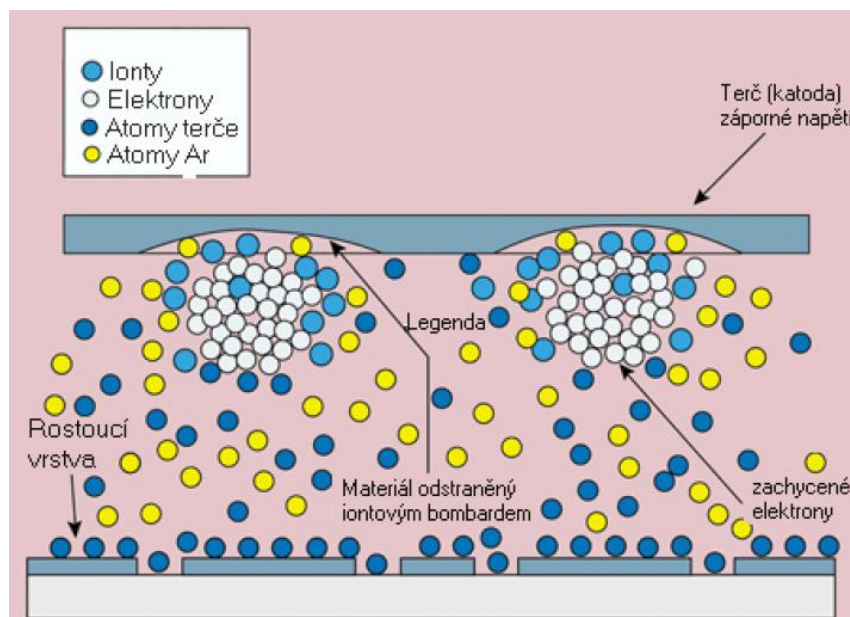
teplotě podstatně nižší, než odpovídá rovnovážné chemické reakci. Podle způsobu uvolňování atomů nanášené látky do plynného skupenství se mohou rozlišit tři významné skupiny metod iontového plátování. Jsou to napařování s přídavnou ionizací, obloukové napařování a magnetronové napařování. Metodou PVD vzniká ostřejší břit než metodou CVD.

Technické specifikace:

- teplota: 250 až 550C
- tloušťka vrstvy 2-8 μm
- frézování, přerušované řezy

Výhody

- nízká teplota depozice
- ekologicky nejšetrnější metoda deponování vrstev
- nízký koeficient tření
- možnost vytvořit velké množství různých druhů (kombinací) vrstev
- možnost výroby malých a přesných rozměrů tloušťek vrstev
- nízké teploty depozic



Obr.2.2.2.1.1 Princip magnetového napařování[16]

2.2.2.2 Typy tenkých otěruvzdorných vrstev

Existuje nespočet typů vrstev, které je možné vytvořit. V základu je možné je rozdělit na:

1. Homogenní

Kovová vazba (TiN, TiC)

Kovalentní vazba (AlN, Bn)

Iontová vazba (Al₂O₃, ZrO₂)

2. Gradientní

Nadeponováním této vrstvy nevznikají ostré přechody ve složení materiálu. Složení vrstev se v průřezu gradientně mění.

3. Multivrstvy

Tyto vrstvy jsou tvořeny pravidelným střídáním dvou typů vrstev s různými vlastnostmi. Vlastnosti vrstvy jako jsou tvrdost, houževnatost závisí na poměru složek obou druhů vrstev. Pravidelným střídáním vrstev se zabrání lavinovitému šíření trhliny. Šíření trhliny má totiž tendenci se na rozhraní těchto dvou vrstev zpomalovat.

4. Nanovrstvy-

Tyto vrstvy se skládají střídáním vrstev o velmi malé tloušťce (10nm) s různými vlastnostmi. Vhodným složením lze minimalizovat šíření mikrotrhlin a lze tím dosáhnout velmi vysoké tvrdosti.

Nanokompozitní vrstvy Tyto vrstvy se skládají z nitridů s kovovou vazbou (TiN, W₂N, VN...) a z kovalentních nitridů (Si₃N₄, BN...)

Druhy tenkých otěruvzdorných vrstev:

TiAlN

Univerzální vysoce výkonná vrstva – nejrozšířenější typ vrstvy, vhodná pro vrtání, frézování, vystružování, vhodná pro obrábění při nedostatečném chlazení, max. teplota použití je 800 °C.

AlTiN

Vysoce výkonná vrstva s vysokou teplotní odolností vhodná pro obrábění tvrdých materiálů a pro obrábění za sucha, max. teplota použití je 900 °C

nACo

Nanokompozitní vysoce odolná vrstva na bázi AlTiN/Si₃N₄. Tato vrstva má velmi vysokou tvrdost a teplotní odolnost až 1200 °C. Je vhodná pro obrábění vysokými řeznými rychlostmi a pro obrábění tvrdých a kalených materiálů.

Al_2O_3

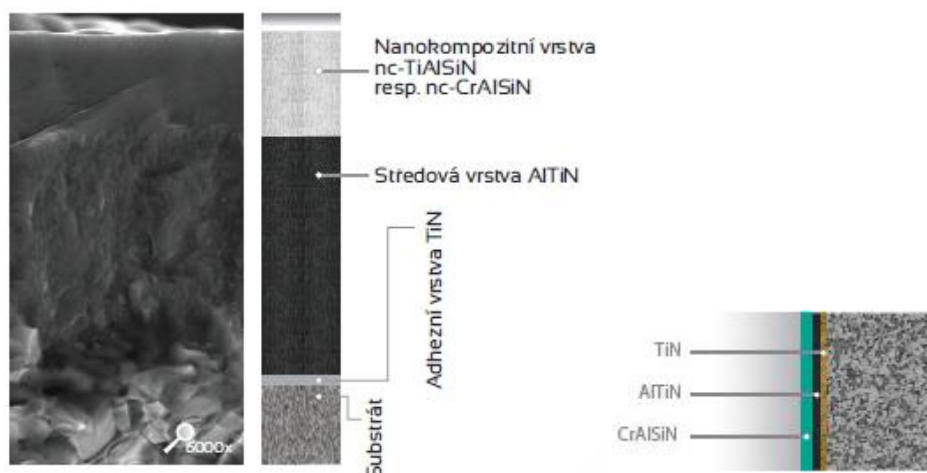
Ideální vrstva pro obrábění vysokými řeznými rychlostmi. Vrstva Al_2O_3 snižuje tření a zvyšuje difúzní odolnost. Tyto vrstvy jsou připravovány technologiemi CVD za vysokých teplot ($>1000^\circ\text{C}$). Pro nástroje, které nemohou takto vysokých teplot dosáhnout, se vyvíjejí vhodné PVD metody s teplotami do 600°C . Pro snížení teplot se do Al_2O_3 přidává Cr_2O_3 a tím se vytvoří tuhý roztok. Takto je vytvořena krystalická fáze, která má výrazně nižší teplotu deponování, než čistý Al_2O_3 . Přitom vlastnosti jsou téměř shodné jako u čistého Al_2O_3 .

Marwin SI od firmy SHM

nanokompozitní povlak TiAlSiN složený ze základní vrstvy o vysoké tvrdosti a z povrchové vrstvy s vysokou chemickou a tepelnou odolností.

TripleCoating od firmy SHM

Tyto vrstvy kombinují vysokou houževnatost a tvrdost vrstev AlTiN a velmi vysokou tvrdost nanokompozitních vrstev. Deponovanou vrstvu tvoří adhezní vrstva TiN, středová vrstva AlTiN a vrchní nanokompozitní vrstva TiAlSiN (TripleCoating Ti) nebo CrAlSiN (TripleCoatingCr). Aby bylo možné dosáhnout optimální adheze, tak vrstva nemůže začínat vícesložkovou adhezní vrstvou, deponovanou za slitinových tarotů (např.:TiAl nebo AlCr). Optimální adheze může být zajištěna vrstvami z Ti – TiN nebo Cr – CrN deponovaných z jednosložkového targetu. Díky nanokompozitní povrchové vrstvě jsou vrstvy TripleCoatings použitelné pro vysoce výkonné operace.



Obr.2.2.2.2 Struktura vrstvy Triple Coatings[18]

Balinit ALDURA od firmy Oerlikon Balzers

Vysoce výkonná vrstva cíleně vyvinutá pro stopkové frézy k obrábění tvrdé oceli, až 60HRC a těžko obrobitelných materiálů. Tato vrstva je složena ze dvou vrstev. Základní vrstva je složená z TiAlN, která zabezpečuje výbornou přilnavost. Vrchní vrstva je složená z nanokrystalického AlCrN. Tato vrstva se vyznačuje vysokou tvrdostí za tepla, vysokou odolností proti korozi a poskytuje velkou tepelnou bariéru.

Balinit ALNOVA od firmy Oerlikon Balzers

Tato vrstva se vyznačuje velkou odolností proti abrazi a vysokou odolností proti oxidaci.

Tab.2.2.2.2 Porovnání druhů vrstev

Povlak	Teplota použití[°C]	DrsnostRa [μm]	Tloušťka [μm]	Mikrotvrdost [GPa]	Barva
TiAlN	800	-	1-4	30	Fialová
AlTiN	900	-	1-4	39	Černá
AlCrN	1000	0,4	1-7	32	Šedo-modrá
nACRo	1100	0,35	1-7	42	Modro-šedá
nACo	1200	-	1-4	45	Fialově-modrá
Balinit ALDURA	>1100	0,25	0,5-4	-	Modro-šedá
Balinit ALNOVA	1100	0,2	0,5-4	-	Světle šedá
Marwin SI	>1000	0,1-0,2	2-3	45	Šedo-černá

3. Návrh a realizace vlastních experimentů

Cílem experimentu bylo porovnat 5 kulových fréz a stanovit, která byla nejvhodnější pro obrábění kalené a popuštěné nástrojové oceli 19436. Nástroje se lišily použitým substrátem a nebo nadeponovanou vrstvou. V závěru byly nástroje porovnány s etalonovým nástrojem. Tento nástroj měl stejný průměr ale jinou geometrii, vrstvu a substrát.

Z důvodu nedostatku nástrojů (pro každý nástroj existovala možnost pouze jednoho opakování) bylo přistoupeno k tomu, že experiment byl rozdělen na dvě části. První část probíhala podle krátkodobé zkoušky podle A.S Kondratova. Pomocí této zkoušky byla vypočtena řezná rychlost pro trvanlivost nástroje 15 minut. Tyto hodnoty poté byly využity pro stanovení řezné rychlosti pro druhou část experimentu, kde již byla provedena dlouhodobá zkouška trvanlivosti pro konkrétní zvolenou řeznou rychlost.

3.1 Použité stroje a zařízení

3.1.1 Použité nástroje



Obr.3.1.1a Nástroje 1-5

Tab.3.1.1a Geometrie nástrojů 1-5

Nástroj 1-5	
úhel hřbetu $\gamma_f[^\circ]$	6
úhel čela $\alpha_f[^\circ]$	11
úhel břitu $\beta_f[^\circ]$	73
stoupání šroubovice $\omega_s(\lambda_s)[^\circ]$	28
průměr nástroje $\varnothing[\text{mm}]$	11,989
házení[mm]	0,061
$r_N[\eta\text{m}]$	12
K[-]	0,7

Na těchto nástrojích byla pomocí přístroje IFM od firmy Alicona naměřená drsnost a plošná drsnost na hřbetě nástroje.

Tab.3.1.1b Drsnost na hřbetě nástrojů 1-5

Nástroj	Drsnost		
	Ra[μm]	Rz[μm]	Sa[μm]
Nástroj 1	0,327	2,29	0,397
Nástroj 2	0,566	4,01	0,602
Nástroj 3	0,386	2,7	0,44
Nástroj 4	0,341	2,14	0,419
Nástroj 5	0,6	3,95	0,638

Z naměřených hodnot vyplynulo, že drsnost je závislá na druhu vrstvy. Při nadeponované vrstvě Triple Coating byla drsnost na hřbetě téměř poloviční oproti drsnosti při nadeponované vrstvě Marwin SI.

Nástroj 6



Obr.3.1.1b Nástroj 6

U tohoto etalonového nástroje byla známá pouze geometrie. Tato geometrie je rozdílná od ostatních testovaných nástrojů.

Tab.3.1.1c Geometrie nástroje 6

Nástroj 6	
úhel hřbetu $\gamma_f[^\circ]$	-1
úhel čela $\alpha_f[^\circ]$	15
úhel břitu $\beta_f[^\circ]$	76
stoupání šroubovice $\omega_s(\lambda_s)[^\circ]$	30
průměr nástroje $\varnothing[\text{mm}]$	11,992
házení[mm]	0,017
$r_N[\eta\text{m}]$	2
K[-]	0,7

3.1.2 Použité výrobní stroje a zařízení

3.1.2.1 CNC frézovací centrum MCV 750A



Obr.3.1.2.1 CNC frézovací centrum MCV 750A

Řada strojů MCV má rám stroje ve tvaru C. Tvar nosného rámu je optimalizován s ohledem na vysokou tuhost a stabilitu. Stroj obsahuje automatickou výměnu nástrojů, a proto umožňuje práci v automatickém cyklu. Jeho technické parametry jsou následující:

Upínací plocha stolu:	1000 x 640mm
Pracovní rozsah:	750 x 500 x 500mm
Max. otáčky vřetena:	13000ot/min
Výkon vřetena:	11,5kW
Pracovní posuv:	1 – 15000mm/min
Počet míst v zásobníku:	24
Rozměru stroje:	3700 x 2200 x 2735mm

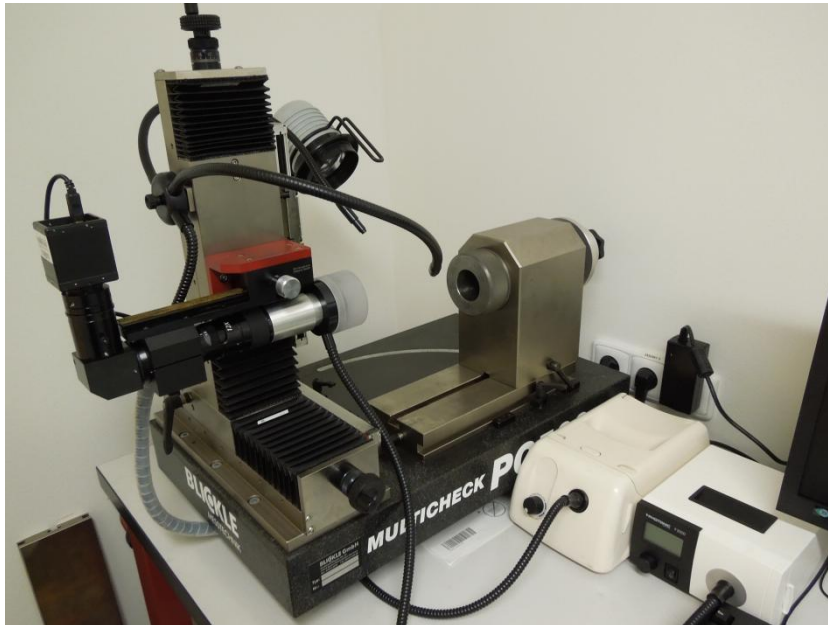
3.1.2.2 Hydraulický upínač



Obr.3.1.2.2 Hydraulický upínač nástrojů

3.1.3 Použité měřicí přístroje

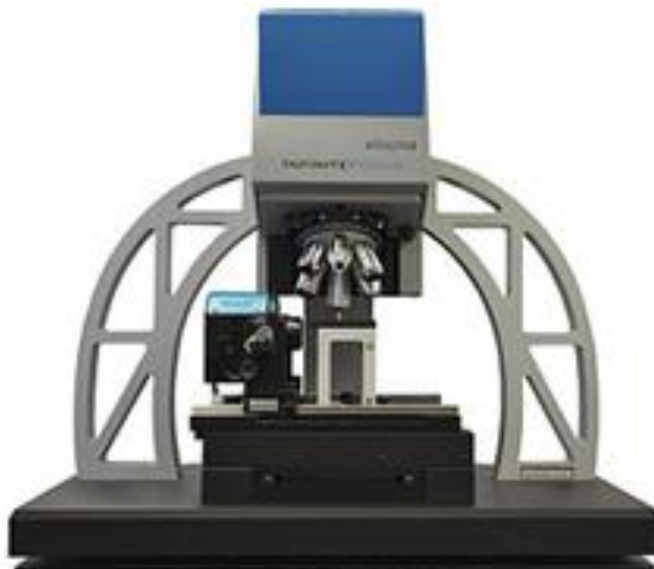
3.1.3.1 Optický mikroskop Multicheck PC 500



Obr.3.1.3.1 Optický mikroskop Multicheck PC 500

Dílenský mikroskop se skládá z granitové desky, na které je umístěn přípravek pro upínání měřeného nástroje. Dále jsou zde pohybové šrouby, které umožňují pohyb v osách x a z. Další částí mikroskopu jsou dvě přídavná světla, jedno volně nastavitelné, vhodné jako doplňkové přisvětlení do drážky nástroje a jedno zabudované přímo v objektivu mikroskopu. Poslední částí je počítač, který umožňuje s pomocí softwaru naměřit opotřebení nástroje.

3.1.3.2 Optický mikroskop Infinite Focus G4



Obr.3.1.3.2 Optický mikroskop Infinite Focus G4

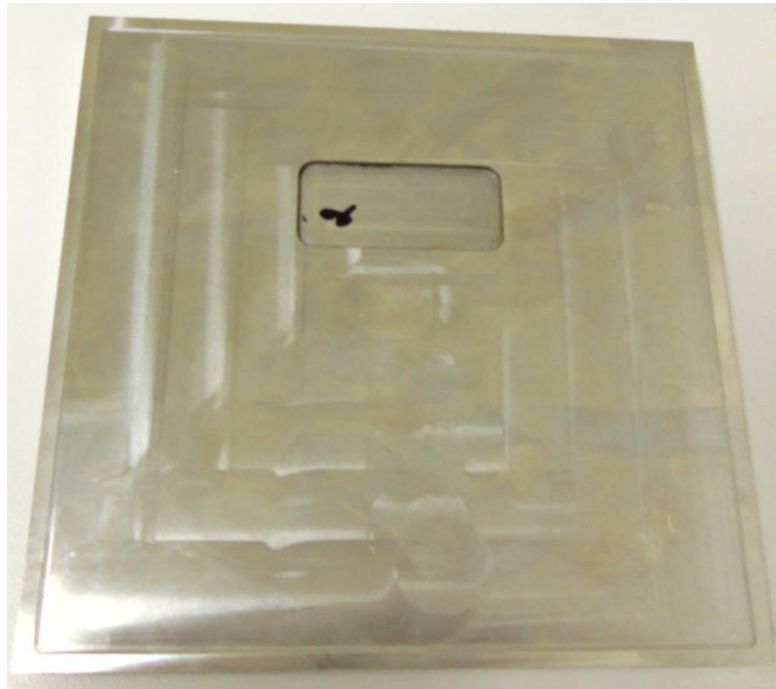
3.2 Návrh a výsledky experimentu

Před zahájením experimentu byla u každého polotovaru změřena tvrdost podle Rockwella. Tyto hodnoty byly porovnány mezi sebou. V případě velkého rozdílu tvrdosti byl tento polotovar vyřazen z experimentu.

Tab.3.2 Naměřené hodnoty tvrdosti polotovarů

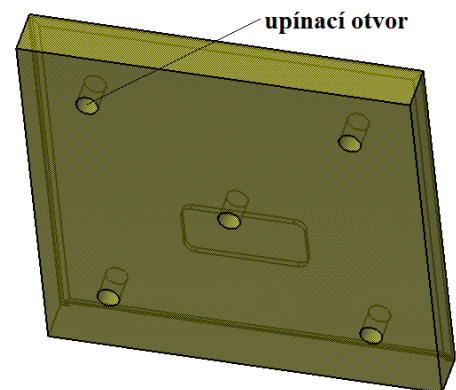
Polotovar	tvrdost[HRC]				průměrná tvrdost [HRC]
1	60	63	64		62,3
2	65	65	63		64,3
3	64	65	63		64,0
4	65	64	63		64,0
5	57	55	55		55,7
6	63	65	68	64	65,0
7	60	62	59	61	60,5
8	68	65	65	64	65,5

Pro účely experimentu bylo zapotřebí vybrat minimálně 3 polotovary, které mají stejnou nebo alespoň velmi podobnou tvrdost. Z důvodu potřeby jednoho polotovaru pro pre – experiment a dvou polotovarů pro první a druhý experiment. Proto byly vybrány polotovary 2,3 a 4. Tyto desky měly tvrdost $64\text{HRC} \pm 1\text{HRC}$.

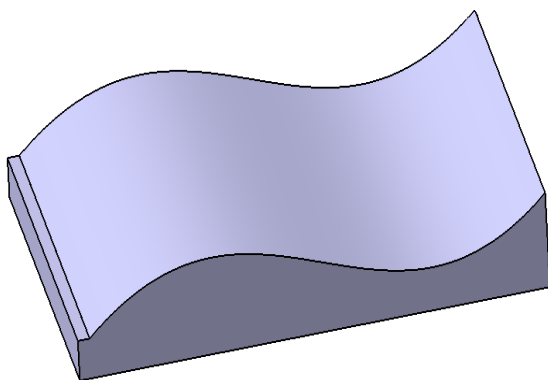


Obr.3.2a Obráběný polotovár

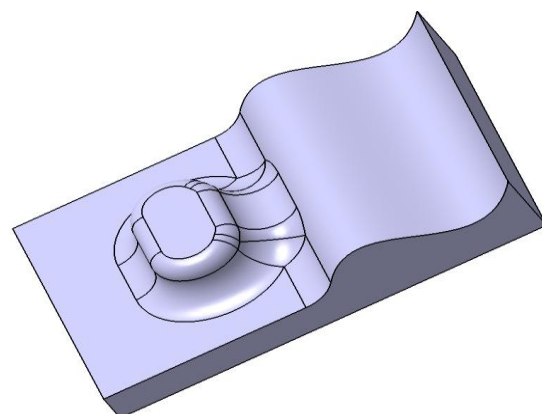
Polotovár byl rozdělen na 6 dílů podle stejného objemu odebraného materiálu. Z každého dílu byla vyrobena jedna součást. Tímto bylo dosaženo stejných podmínek pro všechny nástroje, pokud byl předpoklad, že polotovár měl homogenní strukturu a neobsahoval v určitém místě více či méně defektů či různých vměstků. Tvar byl navržen tak, aby upínací otvory polotovaru neovlivňovaly experiment.



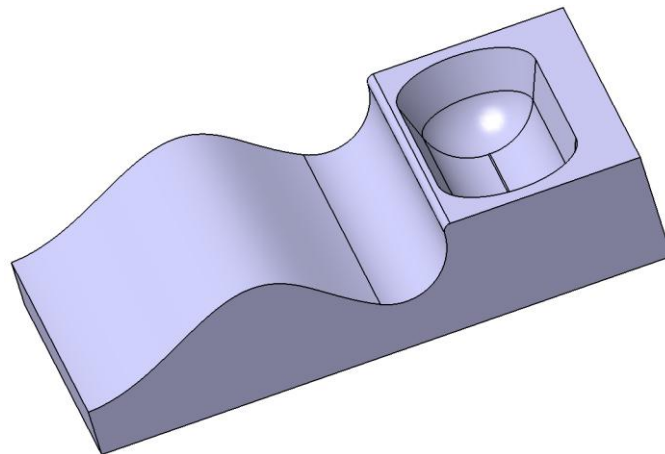
Obr.3.2b Upínací otvory polotovaru



Obr.3.2c. Navržený tvar 1

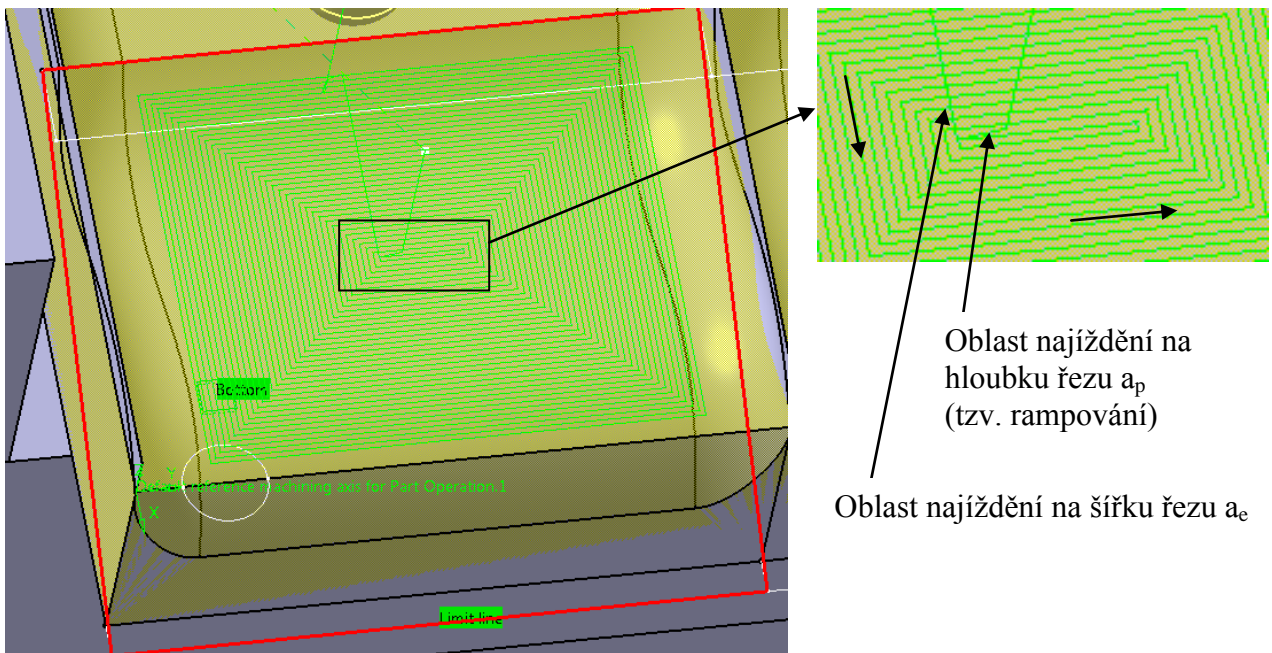


Obr.3.2d Navržený tvar 2



Obr.3.2e Navržený tvar 3

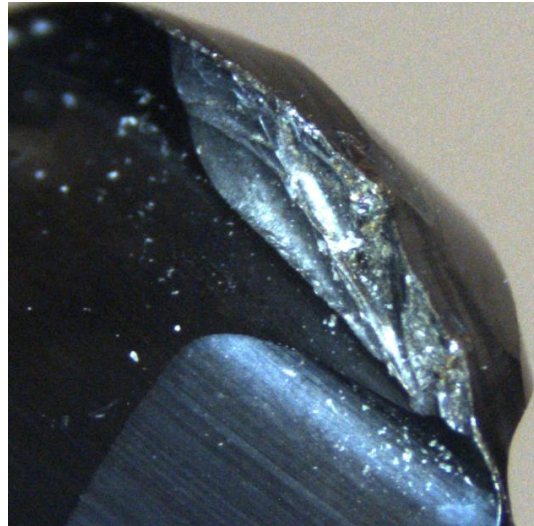
Na základě nejširšího výskytu v praxi byl vybrán tvar 3. Pro tento tvar byl vytvořen program v softwaru Catia V5.



Obr.3.2f Strategie obrábění

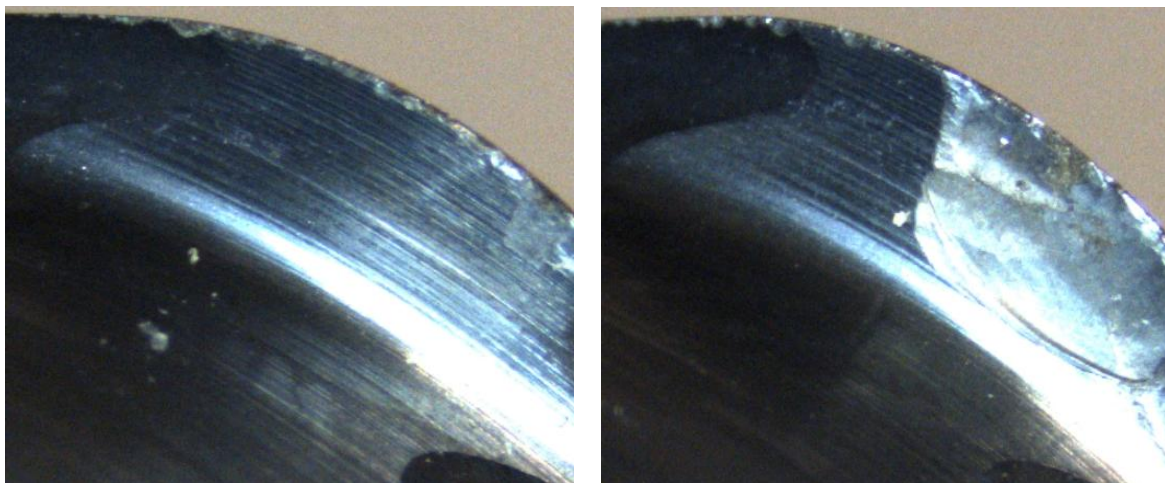
3.2.1 Pre – experiment

V pre – experimentu byly zjištěny řezné podmínky pro první část experimentu. Pro provedení pre – experimentu byl použit nástroj s jemnozrnným substrátem B a vrstvou Marwin SI. Tento pre – experiment probíhal podle krátkodobé zkoušky podle A. S. Kondratova, jako při první části experimentu. Nejprve byla zvolena řezná rychlost 100m/min a krok po 20m/min. Hloubka řezu $a_p=0,6\text{mm}$, $a_e=0,6\text{mm}$ a $f_z=0,12\text{mm}$. Ovšem při tomto testování při obrábění tvarové plochy se zvětšil úhel opásání natolik, že byl v řezu téměř celý profil frézy a tím se zvýšila efektivní řezná rychlost až na 350m/min. Proto došlo k souměrnému vylomení obou břitů.



Obr.3.2.1a Vylomení obou břitů

Proto byla snížena efektivní řezná rychlost na 60m/min. Při této rychlosti ovšem z důvodu vysokého tlaku na břit a poměrně velkých vibrací došlo k mírnému vylomení pouze jednoho břitu. Z tohoto důvodu bylo po domluvě přistoupeno k testování ještě etalonového nástroje, aby byla vyloučena možnost vadného nástroje. U tohoto nástroje ovšem došlo k naprosto totožnému vylomení opět pouze jednoho břitu. Proto byla stanovena pro samotný experiment efektivní řezná rychlost na 80m/min, krok byl snížen na 10m/min a byl také snížen posuv na zub na $f_z=0,06\text{mm}$. Ostatní řezné podmínky zůstaly totožné.



Obr.3.2.1b Vylomení jednoho břitu

3.2.2 Krátkodobá zkouška podle A.S. Kondratova

3.2.2.1 Návrh krátkodobé zkoušky podle A.S. Kondratova

Návrh proběhl ve dvou variantách.

Varianta A:

První úsek probíhal při efektivní řezné rychlosti 80m/min. Tento úsek nebyl použit pro vyhodnocení, protože sloužil pouze pro počáteční otupení břitu, aby samotný experiment probíhal v lineární oblasti Taylorovy křivky. Naměřilo se otupení břitu, které bylo bráno za počáteční stav nástroje. Poté byla součást obráběna opět efektivní řeznou rychlostí 80m/min. Průběžně se zaznamenával čas obrábění. Po skončení obrábění se opět naměřilo otupení břitu. Dále se zvýšila efektivní řezná rychlost na 90m/min. Zaznamenal se opět čas obrábění a poté se naměřilo opět otupení břitu. Postupně se zvýšila řezná rychlost po kroku 10m/min, až do limitního otupení, které bylo stanoveno na $VB=0,2\text{mm}$. Takto bylo obrobena všech 6 součástí na jednom polotovaru, každý jiným nástrojem. Všechny operace byly provedeny při hloubce řezu $a_p=0,6\text{mm}$, šířce řezu $a_e=0,6\text{mm}$ a konstantním posuvu $f_z=0,06\text{mm}$. Po skončení experimentu byla vypočtena řezná rychlost pro trvanlivost nástroje $T=15\text{min}$ a vyhodnotilo se, který z použitých nástrojů byl nejekonomičtější pro obrábění tohoto materiálu. Dále byla porovnána kvalita obrobeneho povrchu.

Varianta B:

Probíhala podobně jako ve variantě A s tím rozdílem, že při dokončení každé operace bylo odebráno co nejvíce třísek vzniklých při obrábění a stroj byl vyčištěn od zbylých třísek. Pomocí metalografického výbrusu byla zjištěna teplota při obrábění a z nich následně bylo určeno, zda byla dosažena oblast HSC obrábění.

Různá řezná rychlost v závislosti na průměru nástroje zapříčinila, že nemohly být odebrány třísky, u kterých by bylo zaručeno, že vznikly při konstantní řezné rychlosti. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k provedení experimentu podle varianty A.

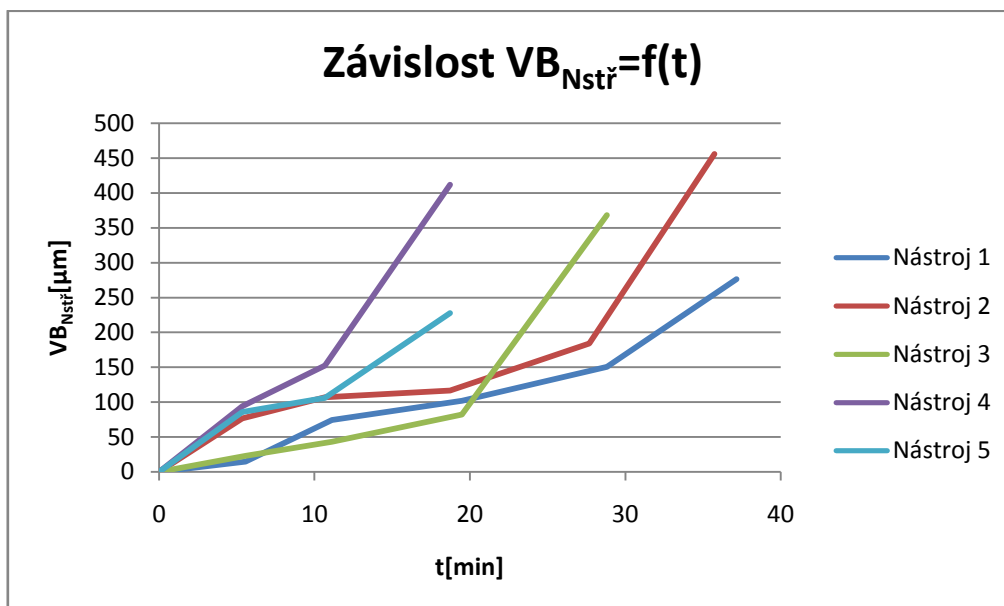
3.2.2.2 Naměřené hodnoty z krátkodobé zkoušky podle A.S. Kondratova

Tab.3.2.2.2 Naměřené hodnoty z krátkodobé zkoušky

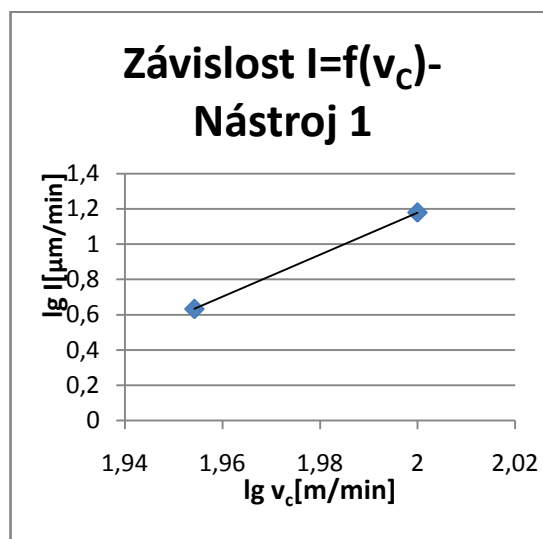
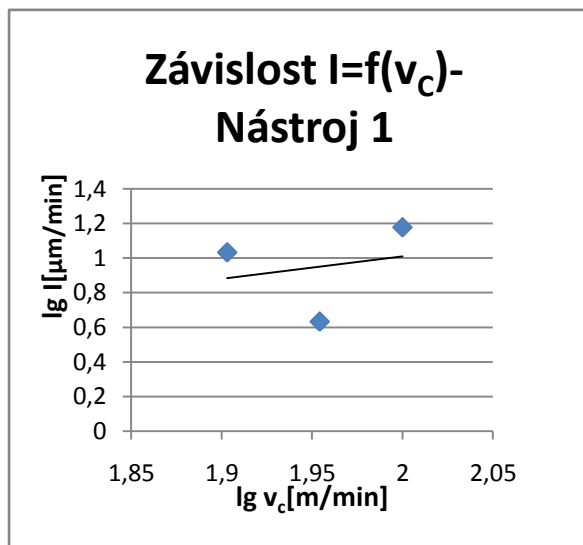
v_C [m/min]	Nástroj 1			Nástroj 3			Nástroj 2					
	t [min]	VB_{N1} [μm]	VB_{N2} [μm]	$VB_{Nstř}$ [μm]	t [min]	VB_{N1} [μm]	VB_{N2} [μm]	$VB_{Nstř}$ [μm]	t [min]	VB_{N1} [μm]	VB_{N2} [μm]	$VB_{Nstř}$ [μm]
80	5,57	17	12	14,5	5,57	24	22	23	5,35	85	68	76,5
80	11,12	74	75	74,5	11,12	48	38	43	10,67	114	100	107
90	19,49	106	98	102	19,49	84	80	82	18,72	123	110	116,5
90	28,81	164	137	150,5	28,81	350	386	368	27,69	193	175	184
100	37,16	342	211	276,5					35,74	468	444	456

v_C [m/min]	Nástroj 4			Nástroj 5				
	t [min]	VB_{N1} [μm]	VB_{N2} [μm]	$VB_{Nstř}$ [μm]	t [min]	VB_{N1} [μm]	VB_{N2} [μm]	$VB_{Nstř}$ [μm]
80	5,35	95	93	94	5,35	92	80	86
80	10,67	124	181	152,5	10,67	108	104	106
90	18,72	399	424	411,5	18,72	235	220	227,5

3.2.2.2.1 Vyhodnocení krátkodobé zkoušky



Graf.3.2.2.2.1a Závislost $VB_{Nstř}=f(t)$



Graf.3.2.2.2.1b Závislost $I=f(v_c)$ – Nástroj 1

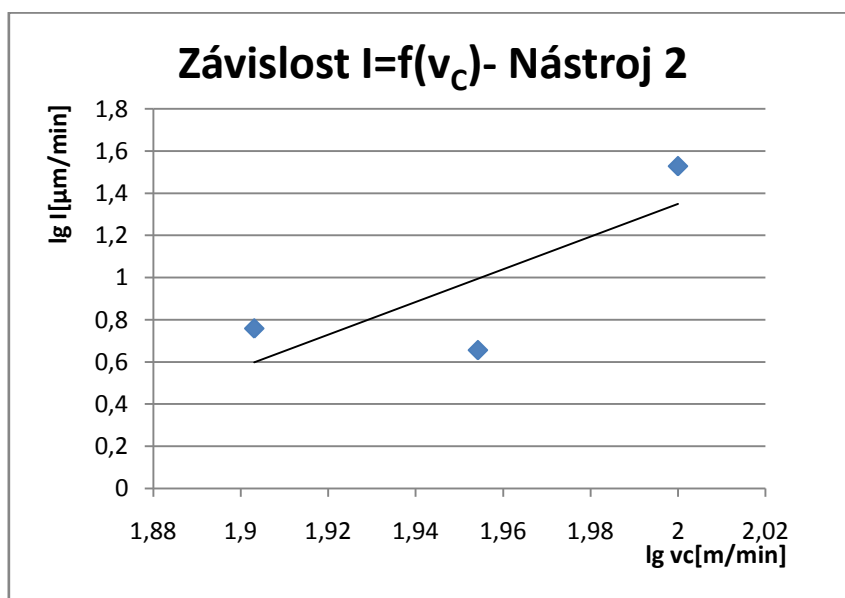
$$I_{ekv} = \frac{\Delta VB}{\Delta t} = \frac{262}{31,59} = 8,294 \mu m / \text{min}$$

$$v_{ekv} = 95,105 m / \text{min}$$

$$m = 11,92$$

$$C_{vT} = v_{ekv} \cdot \left(\sum \Delta T\right)^{\frac{1}{m}} = 95,105 \cdot 31,59^{\frac{1}{11,92}} = 127,05$$

$$v_{15} = \frac{C_{vT}}{T^{\frac{1}{m}}} = \frac{127,05}{15^{\frac{1}{11,92}}} = 101,23 m / \text{min}$$



Graf.3.2.2.2.1c Závislost $I=f(v_c)$ – Nástroj 2

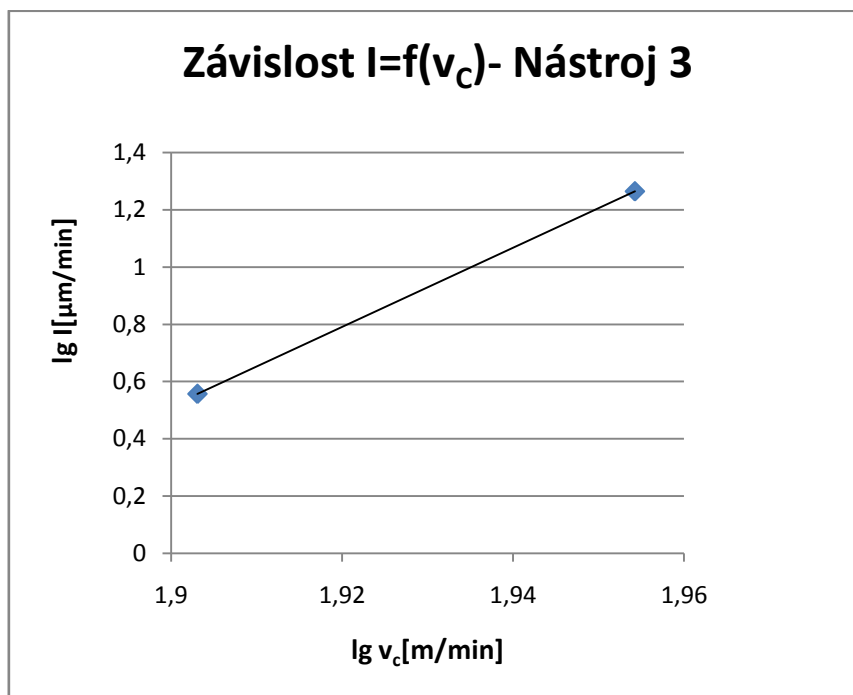
$$I_{ekv} = \frac{\Delta VB}{\Delta t} = \frac{379,5}{30,39} = 12,488 \mu m / \text{min}$$

$$v_{ekv} = 88,23 m / \text{min}$$

$$m = 7,949$$

$$C_{vT} = v_{ekv} \cdot \left(\sum \Delta T \right)^{\frac{1}{m}} = 88,23 \cdot 30,39^{\frac{1}{7,949}} = 145,054$$

$$v_{15} = \frac{C_{vT}}{T^{\frac{1}{m}}} = \frac{145,054}{15^{\frac{1}{7,949}}} = 103,175 m / \text{min}$$



Graf.3.2.2.2.1d Závislost I=f(v_c) – Nástroj 3

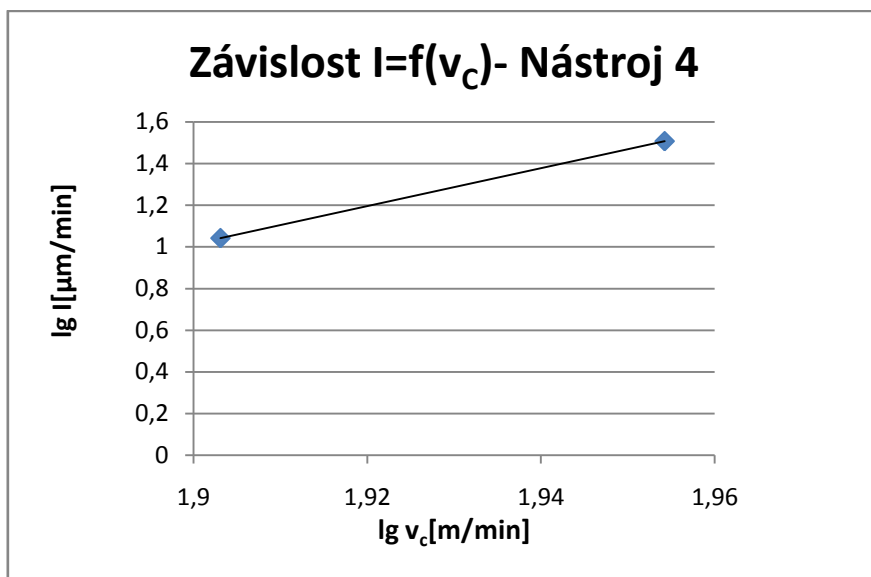
$$I_{ekv} = \frac{\Delta VB}{\Delta t} = \frac{345}{23,24} = 14,845 \mu m / \text{min}$$

$$v_{ekv} = 88,62 m / \text{min}$$

$$m = 13,83$$

$$C_{vT} = v_{ekv} \cdot \left(\sum \Delta T \right)^{\frac{1}{m}} = 88,62 \cdot 23,24^{\frac{1}{13,83}} = 111,255$$

$$v_{15} = \frac{C_{vT}}{T^{\frac{1}{m}}} = \frac{111,255}{15^{\frac{1}{13,83}}} = 91,47 m / \text{min}$$



Graf.3.2.2.2.1e Závislost I=f(v_c) – Nástroj 4

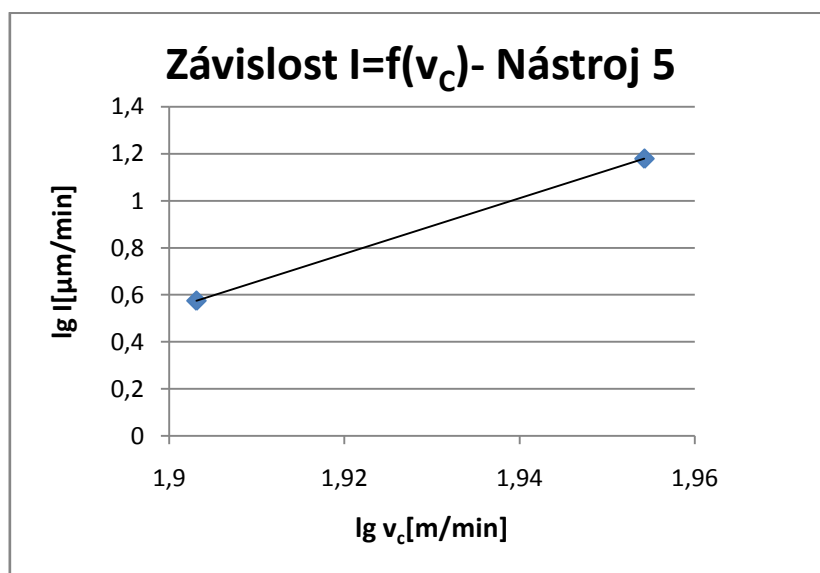
$$I_{ekv} = \frac{\Delta VB}{\Delta t} = \frac{317,5}{13,37} = 23,747 \mu m / min$$

$$v_{ekv} = 87,05 m / min$$

$$m = 9,115$$

$$C_{vT} = V_{ekv} \cdot \left(\sum \Delta T \right)^{\frac{1}{m}} = 87,05 \cdot 13,37^{\frac{1}{9,115}} = 115,695$$

$$v_{15} = \frac{C_{vT}}{T^{\frac{1}{m}}} = \frac{115,695}{15^{\frac{1}{9,115}}} = 85,958 m / min$$



Graf.3.2.2.2.1f Závislost I=f(v_c) – Nástroj 5

$$I_{ekv} = \frac{\Delta VB}{\Delta t} = \frac{141,5}{13,37} = 10,583 \mu m / \text{min}$$

$$v_{ekv} = 87,33 m / \text{min}$$

$$m = 11,801$$

$$C_{vT} = v_{ekv} \cdot \left(\sum \Delta T \right)^{\frac{1}{m}} = 87,33 \cdot 13,37^{\frac{1}{11,801}} = 108,79$$

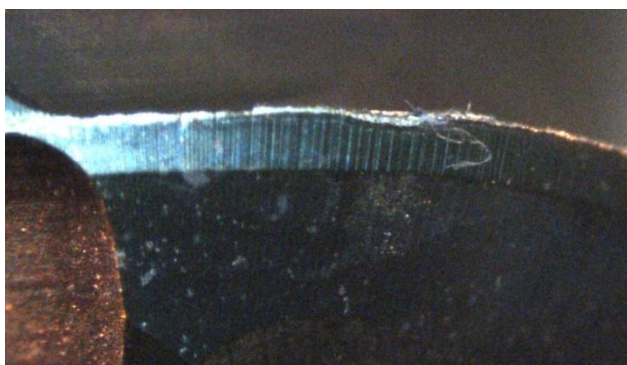
$$v_{15} = \frac{C_{vT}}{T^{\frac{1}{m}}} = \frac{108,79}{15^{\frac{1}{11,801}}} = 86,487 m / \text{min}$$

Tab.3.2.2.2.1 Porovnání řezných rychlostí pro trvanlivost břitu T=15min

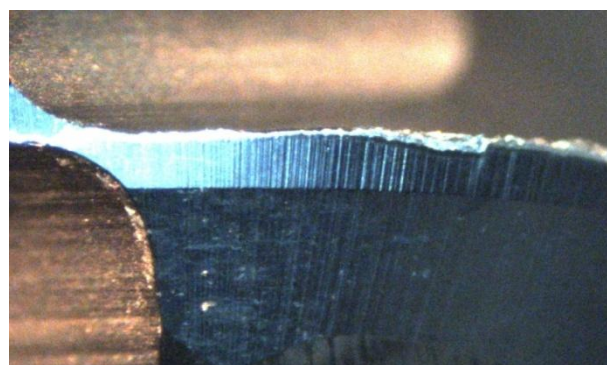
Nástroj	V ₁₅ [m/min]
Nástroj 1	101,23
Nástroj 2	103,18
Nástroj 3	91,47
Nástroj 4	85,96
Nástroj 5	86,49

Z této tabulky je patrné, že nejproduktivnější nástroj je nástroj 2, tedy jemnozrný karbid s vrstvou Marwin SI.

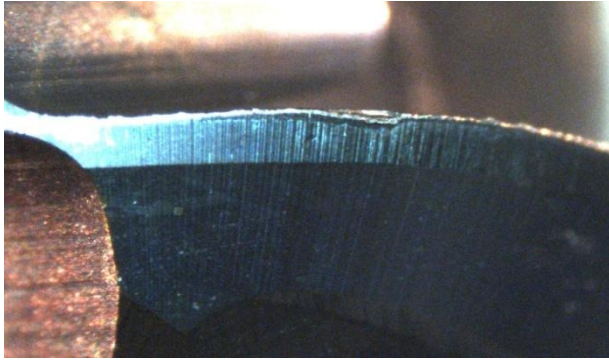
3.2.2.2.2 Stav břitu nástrojů po 19 minutách obrábění



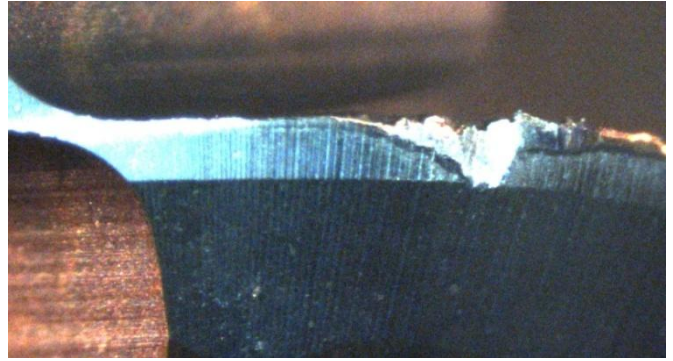
Obr.3.2.2.2.2a Nástroj 1



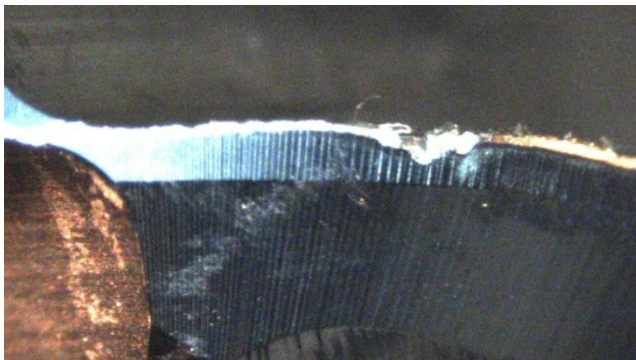
Obr.3.2.2.2.2b Nástroj 2



Obr.3.2.2.2.2c Nástroj 3



Obr.3.2.2.2.2d Nástroj 4



Obr.3.2.2.2.2e Nástroj 5

3.2.3 Dlouhodobá zkouška

3.2.3.1 Návrh dlouhodobé zkoušky

V této části byl obráběn stejný tvar jako v první části experimentu. Z předchozí části bylo stanoveno, při jaké řezné rychlosti probíhala tato část experimentu, ostatní řezné podmínky zůstaly totožné, jako v první části experimentu. NC program byl rozdělen přibližně po dvou minutách, aby byla Taylorova křivka dostatečně proměřena. Nástroje měly totožné řezné podmínky a totožnou strategii obrábění. Z naměřených hodnot bylo stanoveno, jaký nástroj byl nejekonomičtější pro obrábění tohoto materiálu. Obrobený povrch byl naskanován přístrojem Alicona a následně vyhodnocen, jakým mechanismem vznikal povrch s nejlepší jakostí.

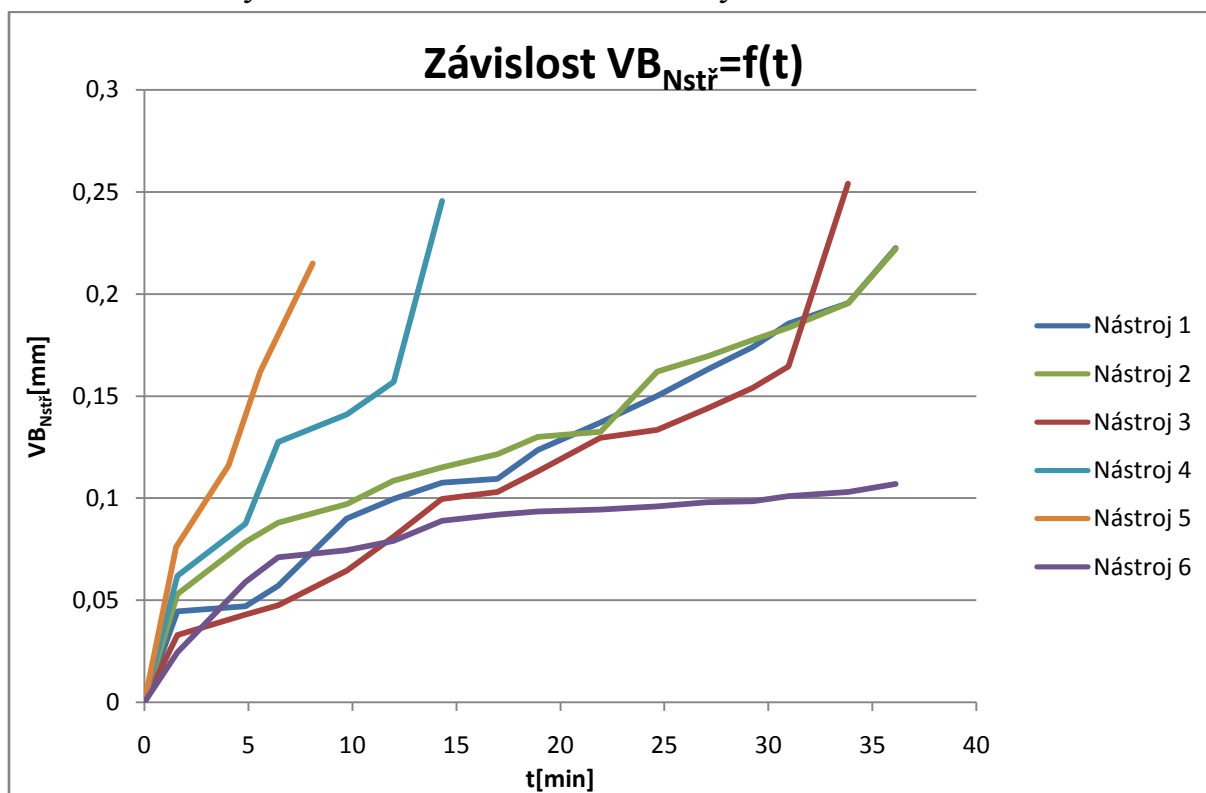
3.2.3.2 Naměřené hodnoty z dlouhodobé zkoušky:

Tab.3.2.3.2 Naměřené hodnoty z dlouhodobé zkoušky

t [min]	Nástroj 1			Nástroj 3			Nástroj 2		
	VB _{N1} [mm]	VB _{N2} [mm]	VB _{Nstř} [mm]	VB _{N1} [mm]	VB _{N2} [mm]	VB _{Nstř} [mm]	VB _{N1} [mm]	VB _{N2} [mm]	VB _{Nstř} [mm]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,58	0,047	0,042	0,0445	0,035	0,031	0,033	0,055	0,051	0,053
4,86	0,049	0,045	0,047	0,043	0,043	0,043	0,077	0,08	0,0785
6,43	0,059	0,055	0,057	0,046	0,049	0,0475	0,087	0,089	0,088
9,73	0,099	0,081	0,09	0,064	0,065	0,0645	0,094	0,1	0,097
11,98	0,104	0,095	0,0995	0,08	0,082	0,081	0,112	0,105	0,1085
14,31	0,115	0,1	0,1075	0,089	0,11	0,0995	0,12	0,11	0,115
16,98	0,117	0,102	0,1095	0,093	0,113	0,103	0,128	0,115	0,1215
18,91	0,125	0,122	0,1235	0,101	0,125	0,113	0,139	0,121	0,13
21,93	0,128	0,146	0,137	0,132	0,127	0,1295	0,141	0,124	0,1325
24,66	0,132	0,168	0,15	0,137	0,13	0,1335	0,194	0,13	0,162
27,08	0,141	0,185	0,163	0,139	0,149	0,144	0,205	0,134	0,1695
29,25	0,145	0,203	0,174	0,142	0,166	0,154	0,21	0,145	0,1775
30,97	0,161	0,21	0,1855	0,144	0,185	0,1645	0,218	0,149	0,1835
33,84	0,173	0,218	0,1955	0,171	0,337	0,254	0,226	0,165	0,1955
36,12	0,209	0,236	0,2225				0,233	0,211	0,222

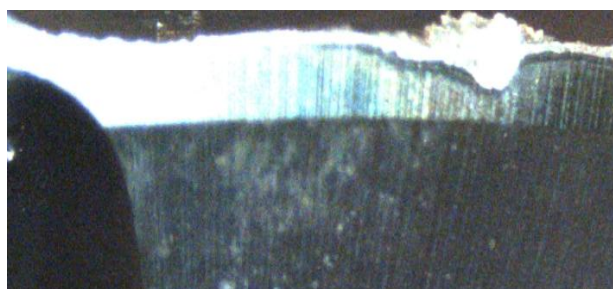
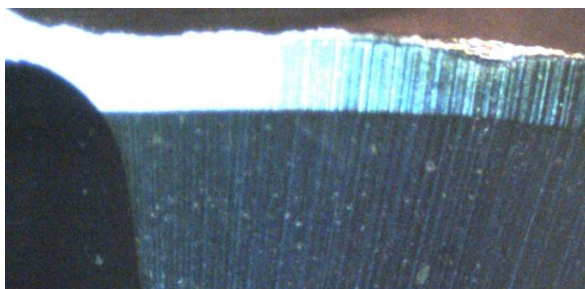
t [min]	Nástroj 6			Nástroj 4			Nástroj 5			
	VB _{N1} [mm]	VB _{N2} [mm]	VB _{Nstř} [mm]	VB _{N1} [mm]	VB _{N2} [mm]	VB _{Nstř} [mm]	t[min]	VB _{N1} [mm]	VB _{N2} [mm]	VB _{Nstř} [mm]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,58	0,025	0,024	0,0245	0,069	0,055	0,062	1,52	0,077	0,075	0,076
4,86	0,083	0,035	0,059	0,092	0,083	0,0875	4,05	0,11	0,122	0,116
6,43	0,102	0,04	0,071	0,124	0,131	0,1275	5,57	0,143	0,181	0,162
9,73	0,105	0,044	0,0745	0,137	0,145	0,141	8,1	0,206	0,224	0,215
11,98	0,11	0,048	0,079	0,153	0,161	0,157				
14,31	0,119	0,059	0,089	0,189	0,302	0,2455				
16,98	0,12	0,064	0,092							
18,91	0,122	0,065	0,0935							
21,93	0,123	0,066	0,0945							
24,66	0,125	0,067	0,096							
27,08	0,126	0,07	0,098							
29,25	0,126	0,071	0,0985							
30,97	0,127	0,075	0,101							
33,84	0,127	0,079	0,103							
36,12	0,13	0,084	0,107							

3.2.3.3 Vyhodnocení dlouhodobé zkoušky

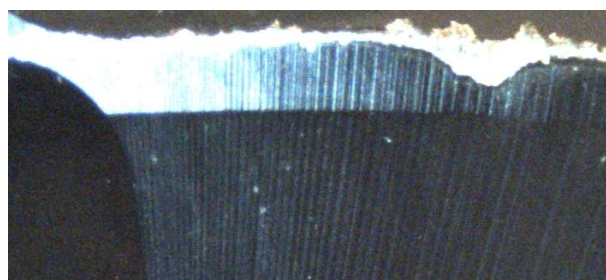


Graf.3.2.3.3 Závislost $VB_{Nstř}=f(t)$

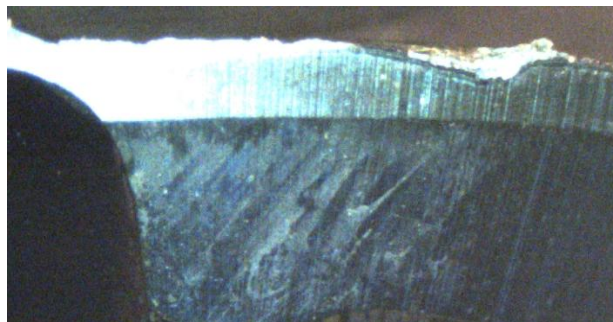
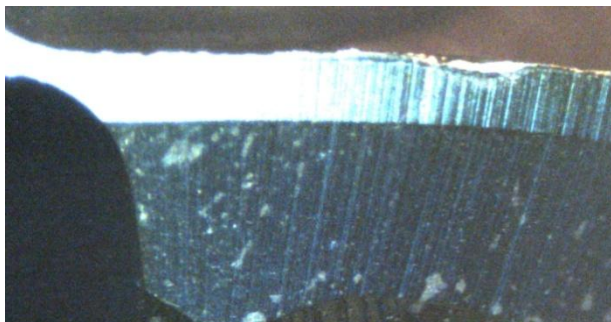
3.2.3.3.1 Opatření nástroje po 14 minutě obrábění a po dosažení limitního otupení



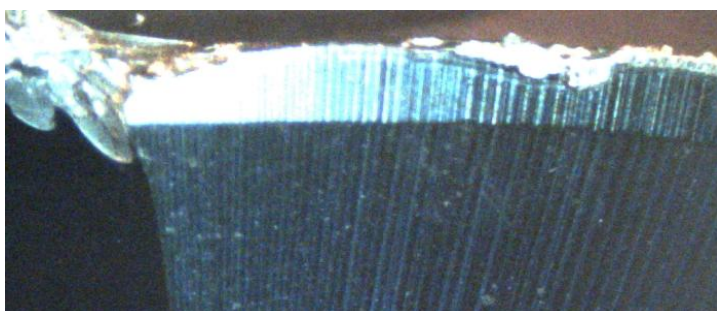
Obr.3.2.3.3.1a Nástroj 1 po 14 a 36 minutách obrábění



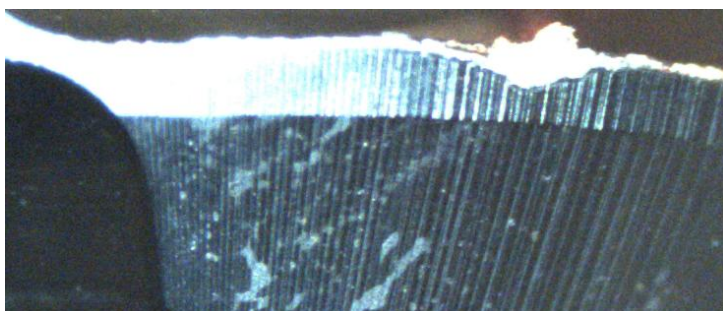
Obr.3.2.3.3.1b Nástroj 2 po 14 a 36 minutách obrábění



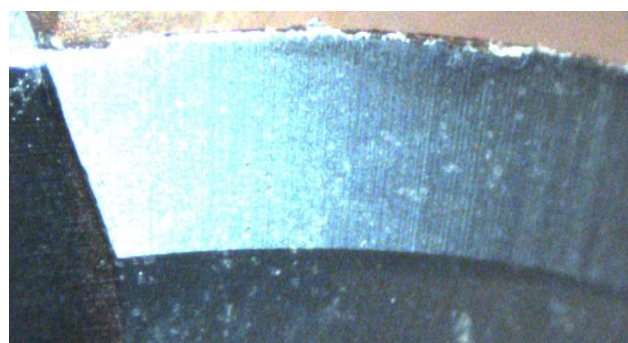
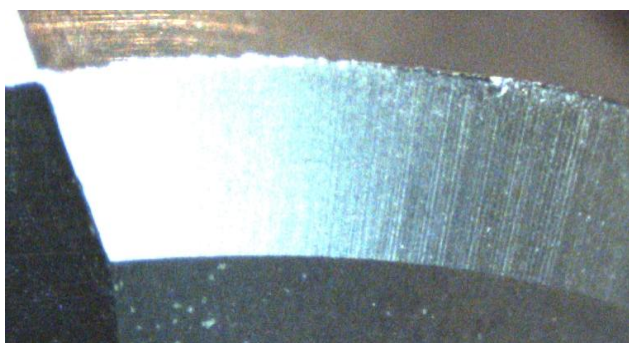
Obr.3.2.3.3.1c Nástroj 3 po 14 a 33 minutách obrábění



Obr.3.2.3.3.1d Nástroj 4 po 14 minutách obrábění

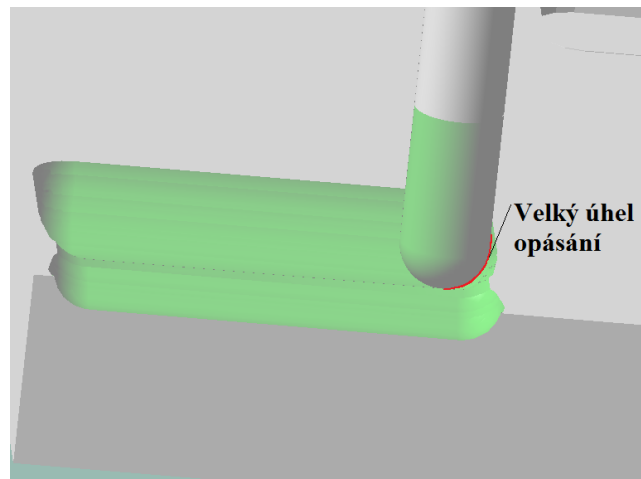


Obr.3.2.3.3.1e Nástroj 5 po 8 minutách obrábění



Obr.3.2.3.3.1f Nástroj 6 po 14 a 36 minutách obrábění

Z naměřených hodnot bylo patrné, že nástroje 1, 2, 3 a 6 měly minimálně dvojnásobnou trvanlivost než nástroje 4 a 5, které byly vyrobeny z hrubozrnného karbidu. Tyto nástroje se tedy ukázaly jako nevhodné pro obrábění takto tvrdého materiálu. Největší trvanlivost vykazoval etalonový nástroj. Tento nástroj i po 36 minutách obrábění vykazoval menší než limitní hodnotu opotřebení. Z ostatních testovaných nástrojů vykazovaly nejlepší výsledky nástroje vyrobené z jemnozrnného karbidu A bez ohledu na vrstvu. Nástroj 3 vyrobený z jemnozrnného karbidu B vykazoval podobné vlastnosti jako jemnozrnný karbid A, ovšem se zvýšením úhlu opásání a tím i zvýšení teploty obrábění byl nástroj intenzivněji otupován než nástroj z jemnozrnného karbidu A. Tato vlastnost byla zjištěna i při krátkodobé zkoušce, kde byla ovšem také zvyšována řezná rychlost a tím se ještě zvětšila teplota obrábění.

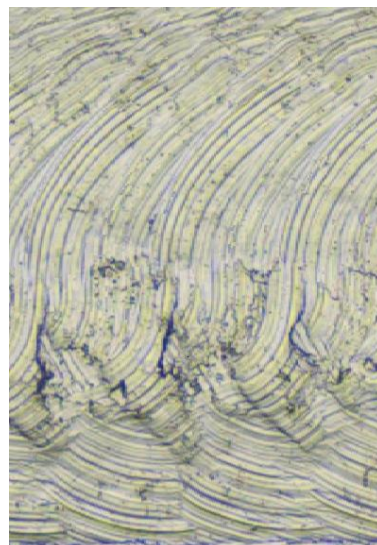
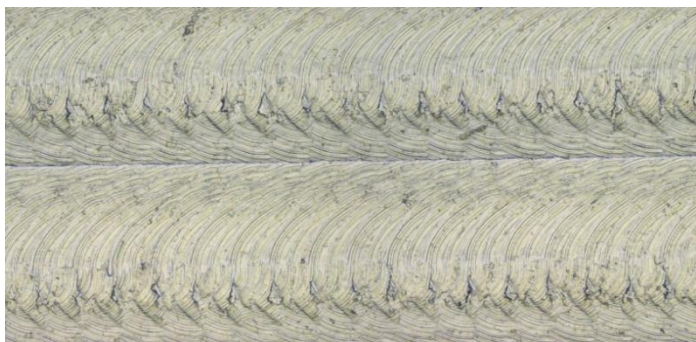


Obr.3.2.3.3.1g.Velký úhel opásání

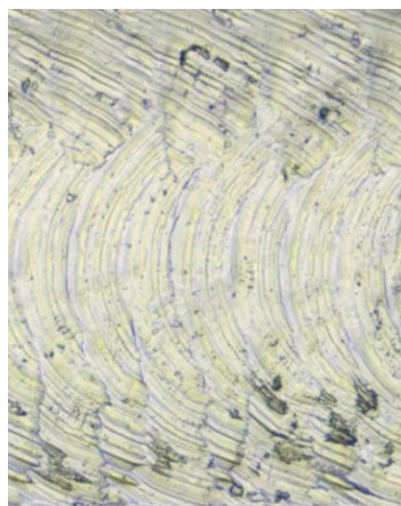
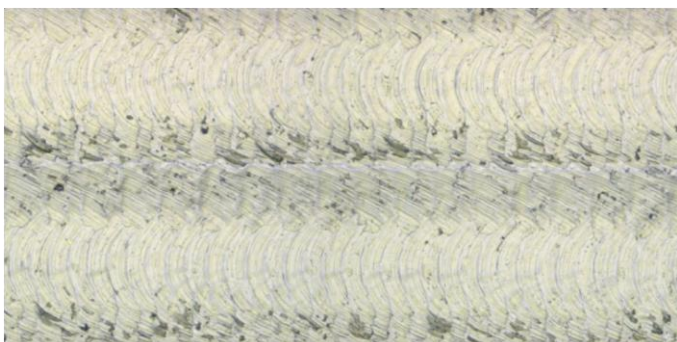
3.2.3.3.2 Kvalita obrobené plochy po dlouhodobé zkoušce trvanlivosti

Během dlouhodobé zkoušky byl nascanován obrobený povrch a na něm naměřena drsnost pomocí optického přístroje IFM od firmy Alicona. Měření povrchu probíhalo po čtrnácti minutách obrábění, tedy době, kdy na nástroji s nejnižší životností bylo dosaženo mezní hodnoty otupení. Pouze u nástroje 5 bylo dosaženo limitní hodnoty otupení ještě před touto dobou obrábění. Z následujících obrázků nascanovaných ploch je patrné, že i při použití nástrojů se stejnou geometrií (nástroje 1 – 5) vznikal povrch s jinou topografií.

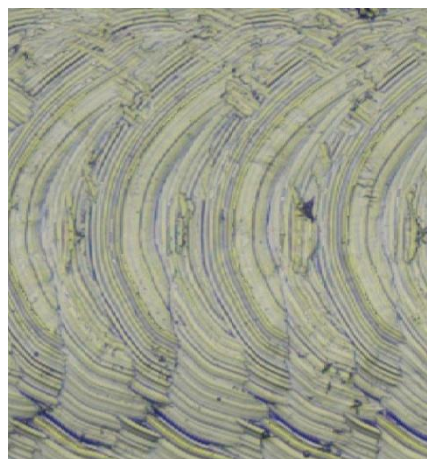
Nascanovaná plocha po obrobení:



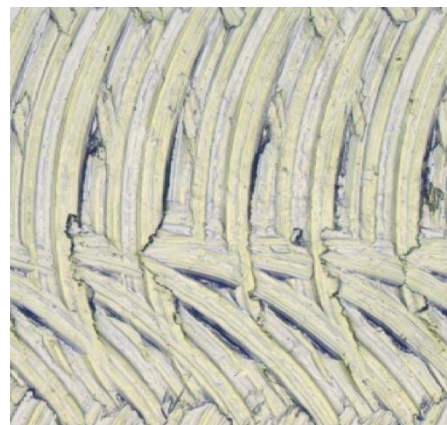
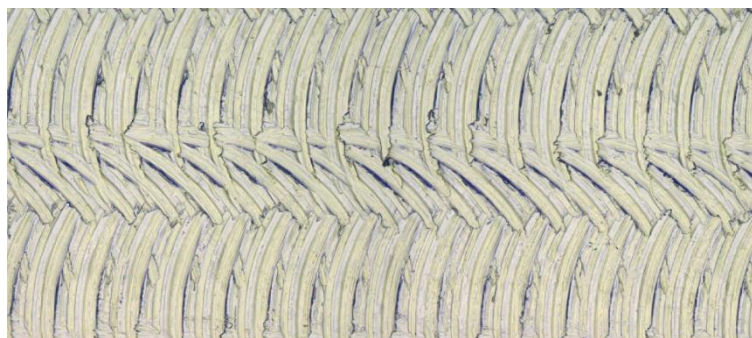
Obr.3.2.3.3.2a Povrch obroběný nástrojem 1



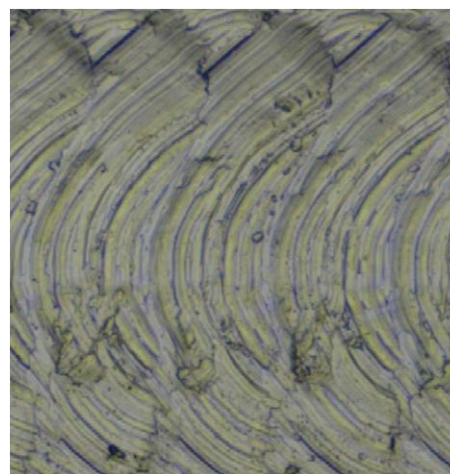
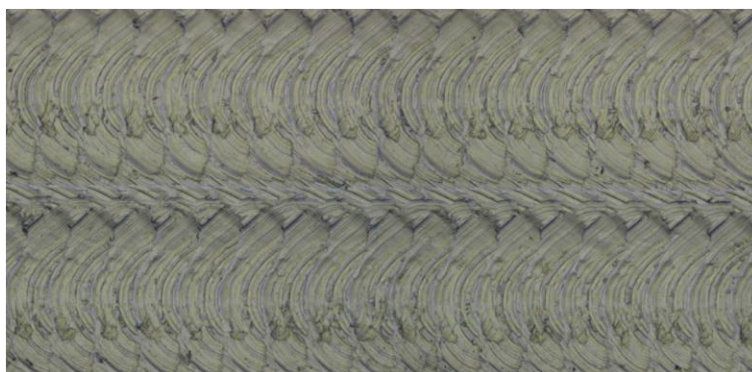
Obr.3.2.3.3.2b Povrch po obrobení nástrojem 2



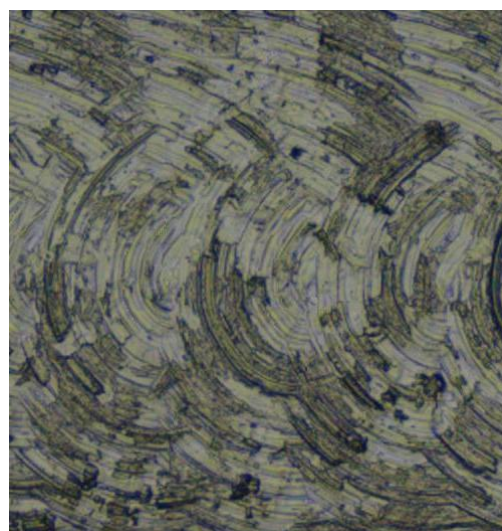
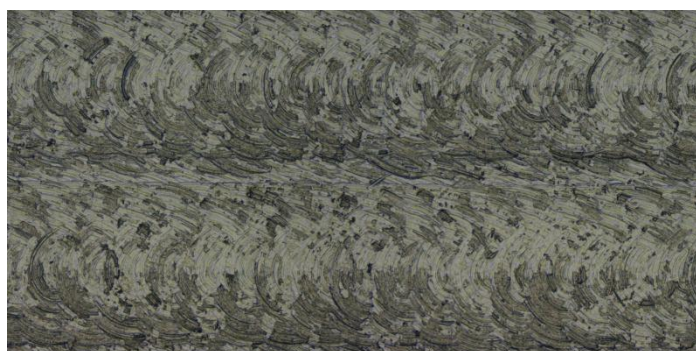
Obr.3.2.3.3.2c Povrch po obrobení nástrojem 3



Obr.3.2.3.3.2d Povrch po obrobení nástrojem 4



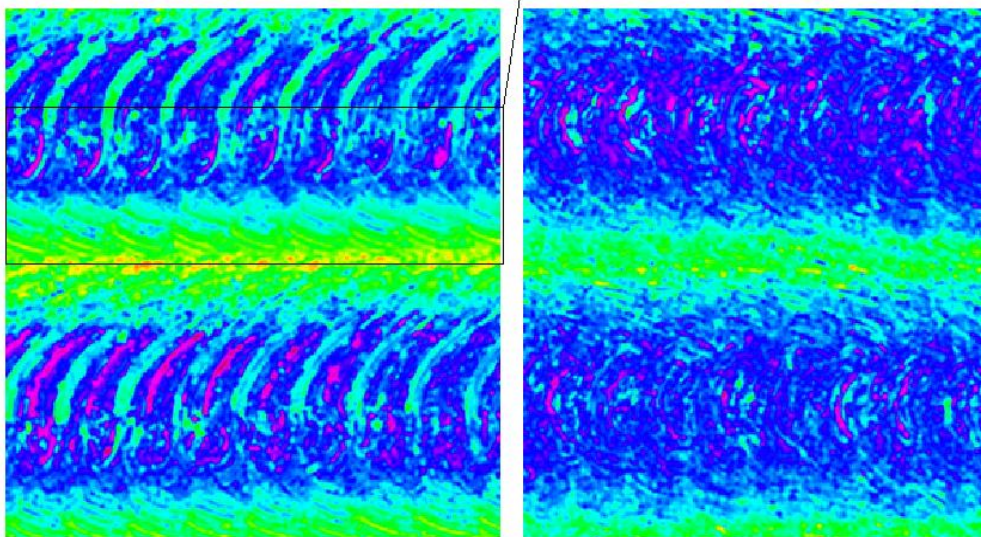
Obr.3.2.3.3.2e Povrch po obrobení nástrojem 5



Obr.3.2.3.3.2f Povrch po obrobení nástrojem 6

Pomocí přístroje IFM byla naměřena plošná drsnost při obrábění. Drsnost byla naměřená v naznačené oblasti, proto bylo nutné nascanovaný povrch rozvinout do roviny, aby hodnota drsnosti nebyla zkreslená o poloměr nástroje. Výsledná hodnota drsnosti proto může být zkreslená pouze o výrobní odchylku nástroje. Jako nejvíce vypovídající parametr drsnosti byl zvolen parametr S_a , proto bylo z naměřených výsledků (viz následující tabulka) patrné, že povrch s nejmenší drsností byl po obrobení etalonovým nástrojem. Z ostatních nástrojů byl povrch s nejmenší drsností po obrobení nástrojem z jemnozrného karbidu A a vrstvou MarwinSI.

Oblast měření plošné drsnosti

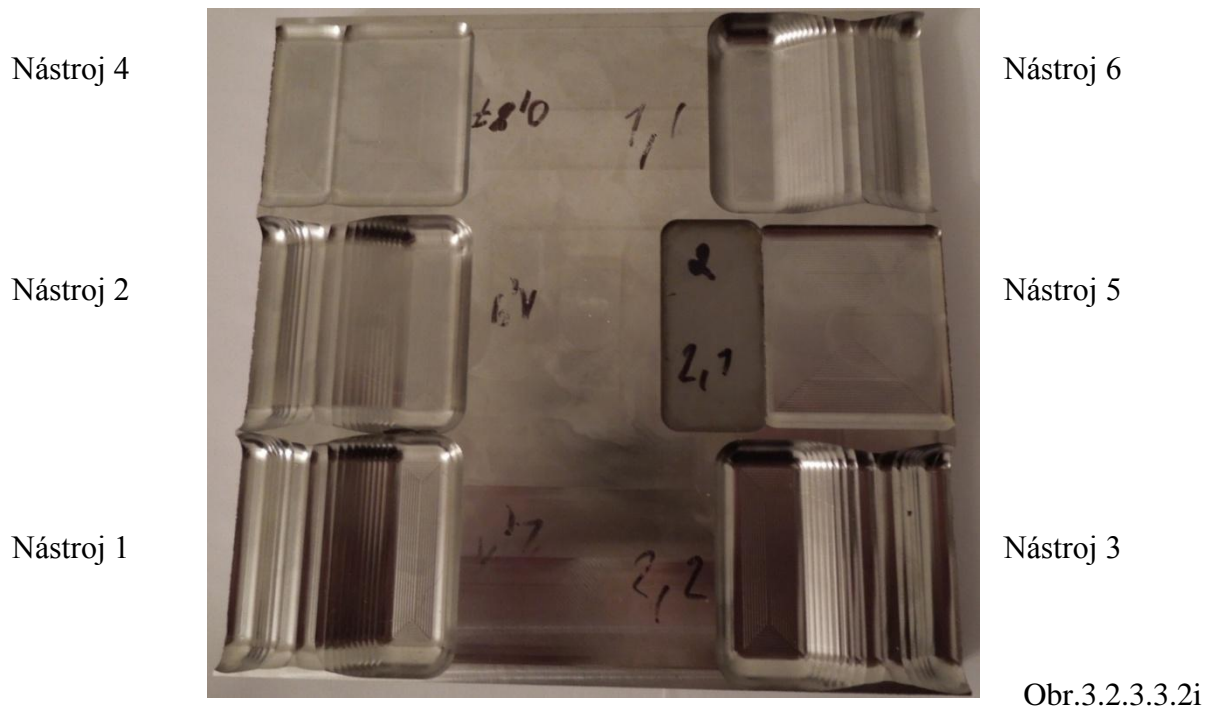


Obr.3.2.3.3.2g Drsnost po nástroji 1

Obr.3.2.3.3.2h Drsnost po nástroji 6

Nástroj	S_a [μm]	L_c [μm]	S_z [μm]	S_q [μm]
1	2,576	519,9	25,21	3,27
2	2,115	520	27,63	2,72
3	2,778	519,9	24,91	3,45
4	2,59	519,9	38,09	3,38
5	2,352	519,9	24,21	2,98
6	1,544	519,9	19,4	2

Tab.3.2.3.3.2a Tabulka drsnosti povrchu



Obr.3.2.3.3.2i

Obrobený polotovár po dlhodobé zkoušce
Na obrobeném povrchu byla také měřena hodnota tvrdosti – viz následující tabulka.

Tab.3.2.3.3.2b Tabulka tvrdosti obrobeného povrchu

Nástroj	Tvrdost obrobeného povrchu [HRC]			Průměrná tvrdost [HRC]
Nástroj 1	64	64	63	63,6
Nástroj 2	63	64	64	63,6
Nástroj 3	63	61	61	61,6
Nástroj 4	61,5	62	62,5	62
Nástroj 5	61	62	63	62
Nástroj 6	63	65	62	63,3

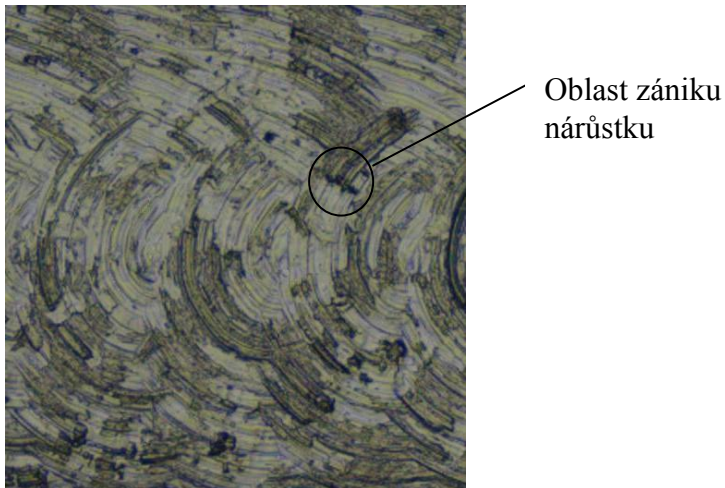
Největší tvrdost obrobeného povrchu byla naměřena po obrábění nástrojem 1 a 2, tedy nástroji ze substrátu A. Tvrdost povrchu obrobeného etalonovým nástrojem byla také vysoká. Tato tvrdost byla vyšší než po nástroji 3, 4 a 5 z důvodu odlišné geometrie nástroje, než u ostatních nástrojů. Rozdíl mezi tvrdostí obrobku po obrábění nástrojem ze substrátu A a ostatními nástroji lze přičíst nízkému opotřebením těchto nástrojů.

4. Technicko-ekonomické hodnocení

Technicko-ekonomické hodnocení se spíše bude týkat druhé části experimentu neboli dlouhodobé zkoušky trvanlivosti. V této části experimentu byl testován i etalonový nástroj.

Nástroje byly porovnány s etalonovým nástrojem z hlediska trvanlivosti, jako nejlepší se jevil etalonový nástroj. Nejvíce se tomuto nástroji přiblížily nástroje ze substrátu A bez ohledu na vrstvu. U substrátu B docházelo se zvýšeným úhlem opásání a tím i zvýšené teploty k intenzivnějšímu opotřebení než u substrátu A.

Z hlediska kvality povrchu se etalonovému nástroji přiblížil nejvíce nástroj se substrátem A a vrstvou Marwin SI. Kvalita povrchu samozřejmě souvisela nejvíce s geometrií a opotřebením nástroje. Etalonový nástroj měl negativní úhel čela na rozdíl od ostatních nástrojů, které měly úhel čela pozitivní. Toto souviselo se stabilitou řezného procesu a trvanlivostí nástroje. Při obrábění velmi tvrdých materiálů je výhodné mít negativní úhel čela a to z důvodu, že při obrábění není řezná hrana jako první ve styku s obráběným materiálem. Proto byla trvanlivost nástroje s negativní geometrií větší než u nástrojů s pozitivní geometrií, pokud se jedná o obrábění tvrdých materiálů. Použitím nástroje s negativní geometrií lze také snížit vibrace, které vznikaly u dvoubřitých nástrojů zejména tím, že nelze mít alespoň dva břity v záběru, což je základní požadavek na stabilitu řezného procesu. Při použití negativní geometrie samozřejmě vznikalo větší teplo spojené s tím, že materiál byl více protvářen. Ovšem ze subjektivního hlediska, po obrábění etalonovým nástrojem s negativní geometrií byl tento nástroj při vyjmutí z vřetena chladnější než ostatní nástroje. Takže jediným vysvětlením zůstalo, že na tomto nástroji byla nadeponovaná vrstva zabraňující přestupu tepla z místa řezu do nástroje. Povrch po obrobení nástrojem s negativní geometrií byl značně zdeformován, to bylo způsobené tím, že zde vznikala intenzivnější plastická deformace než u ostatních nástrojů. Na povrchu bylo také možné vidět oblast vzniku a zániku nestabilního nárůstu.



Obr.4 Povrch po obrobení nástrojem 6

Povrch byl nascenován po 14 minutách obrábění. Na nástrojích 4 a 5 již bylo dosaženo limitního opotřebení, proto na těchto površích byla patrná značná rýha, která byla způsobená právě velkým opotřebením. Na ostatních površích se tato rýha nevyskytovala, protože opotřebení ostatních nástrojů po této době obrábění nebylo vyšší než 0,09mm.

Při provádění experimentu bylo ověřeno z teoretických znalostí, že u etalonového nástroje s negativní geometrií vznikaly menší vibrace. Čistě subjektivní pocit byl, že nástroje s vrstvou MarwinSI měly vyšší povrchovou teplotu při vyjmutí z vřetena stroje, než nástroje s nadeponovanou vrstvou Triple Coating.

4.1 Ekonomické hodnocení

Ekonomické hodnocení testovaných nástrojů se zabývalo pouze cenou nástrojů, protože ostatní náklady na obrábění, jako je hodinová sazba stroje, náklady na obsluhu stroje a další, byly pro všechny nástroje stejné, a proto bylo možné tyto náklady z výpočtu vynechat.

4.1.1 Ekonomické hodnocení krátkodobé zkoušky

4.1.1.1 Odebraný materiál při krátkodobé zkoušce

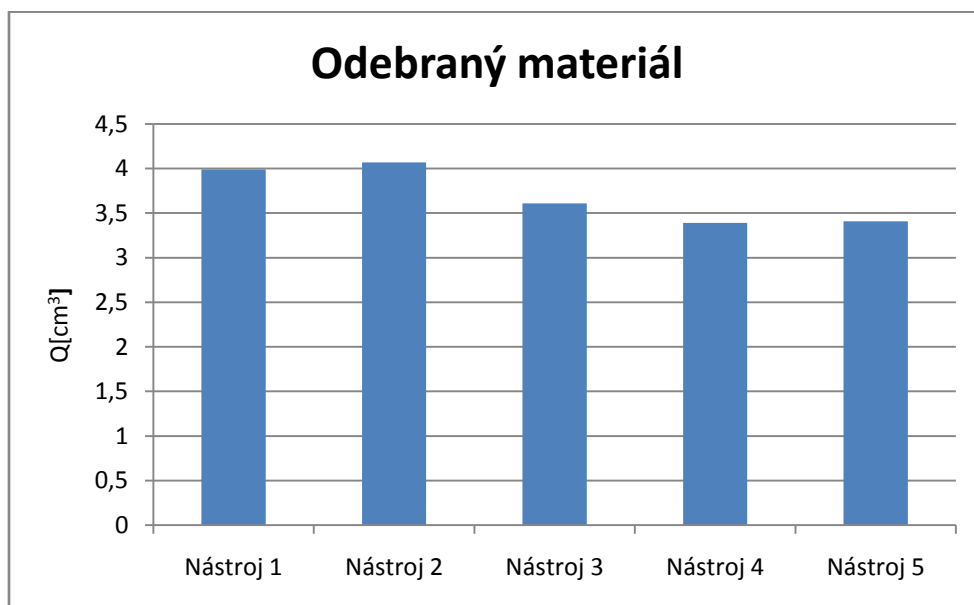
Výsledkem krátkodobé zkoušky byla řezná rychlost pro trvanlivost břitu $T=15$ min.

Z této řezné rychlosti byl stanoven objem odebraného materiálu ze vzorce:

$$Q_t = \frac{v_c \cdot a_p \cdot a_e \cdot f_z \cdot z \cdot 1000}{\pi \cdot d_{ef}} \cdot T [cm^3]$$

Tab.4.1.1.1 Odebraný materiál při krátkodobé zkoušce

Nástroj	1	2	3	4	5
Q[cm ³]	3,99	4,07	3,61	3,39	3,41

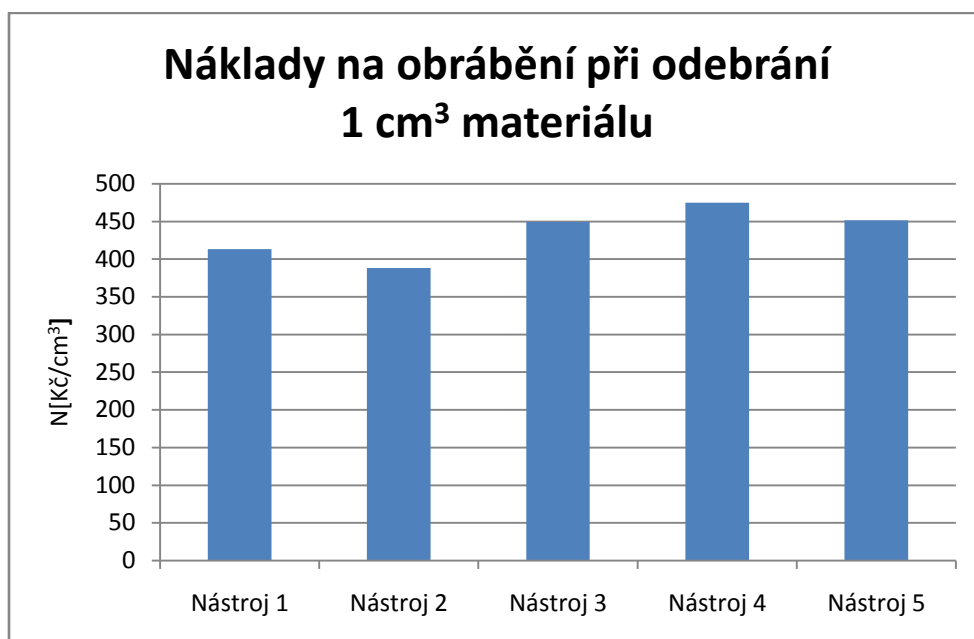


Graf.4.1.1.1 Odebraný materiál při krátkodobé zkoušce

4.1.1.2 Náklady na obrábění

Tab.4.1.1.2 Náklady na obrábění při odebrání 1 cm³

Nástroj	1	2	3	4	5
Q[cm ³]	3,99	4,07	3,61	3,39	3,41
C _N [Kč]	1650	1580	1622	1610	1540
N _{cm³} [Kč/cm ³]	414	388	449	475	452



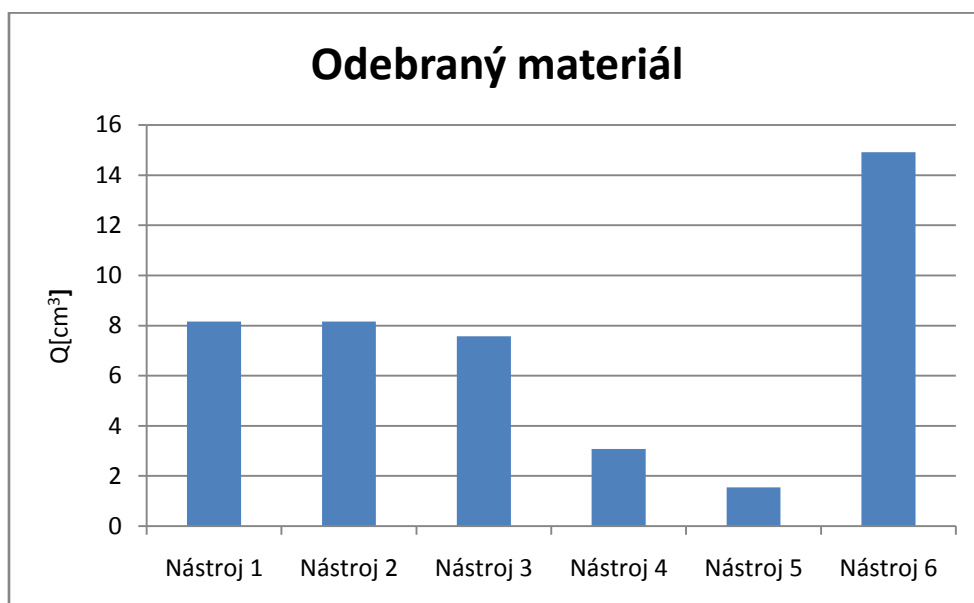
Graf.4.1.1.2 Náklady na obrábění při odebrání 1 cm³

4.1.2 Ekonomické hodnocení dlouhodobé zkoušky

4.1.2.1 Odebraný materiál

Tab.4.1.2.1 Odebraný materiál při krátkodobé zkoušce

Nástroj	1	2	3	4	5	6
Q[cm ³]	8,16	8,16	7,57	3,08	1,54	14,91

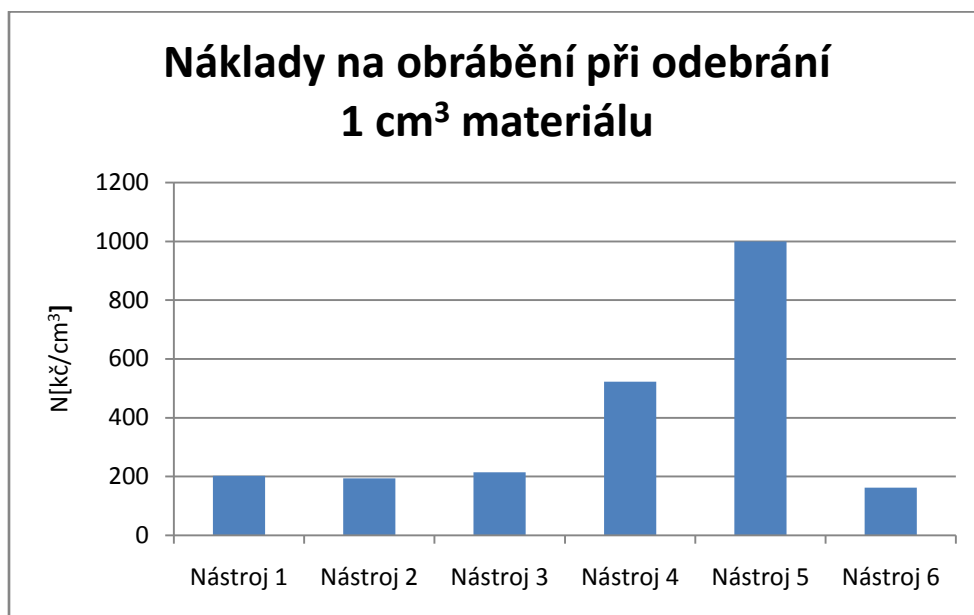


Graf.4.1.2.1 Odebraný materiál při dlouhodobé zkoušce

4.1.2.2 Náklady na obrábění

Tab.4.1.2.2 Náklady na obrábění při odebrání 1 cm³

Nástroj	1	2	3	4	5	6
Q[cm ³]	8,16	8,16	7,57	3,08	1,54	14,91
C _N [kč]	1650	1580	1622	1610	1540	2412
N _{cm³} [kč/cm ³]	202	194	214	523	1000	162



Graf.4.1.2.2 Náklady na obrábění při odebrání 1 cm³ při dlouhodobé zkoušce

4.1.3 Výsledky ekonomického hodnocení

Z ekonomického hodnocení vyplynulo, že nejekonomičtější nástroj byl podle předpokladů etalonový nástroj. Etalonovému nástroji se nejvíce přiblížil nástroj z jemnozrnného karbidu A s nedeponovanou vrstvou MarwinSI. Vhodnou alternativou k tomuto nástroji by mohl být nástroj složený opět z jemnozrnného karbidu A a nadeponovanou vrstvou Triple Coating. Použitím těchto nástrojů bylo možné uspořit velké množství nákladů na nástroje a také velké množství času na výměnu nástroje a tím i dalších výrobních nákladů. Použití nástrojů z hrubozrnného karbidu by nebylo hospodárné. Z ekonomického hodnocení byl tedy velmi patrný rozdíl mezi nástrojem s hrubozrnným a jemnozrnným karbidem. Nasazením nástroje s jemnozrnným karbidem lze ušetřit až 806 Kč na obrábění při odebrání 1cm³ materiálu na rozdíl od nasazení nástroje s hrubozrnným karbidem.

5. Závěr

Tato diplomová práce se zabývá v současné době velmi žádanou problematikou obrábění ocelí o vyšší tvrdosti pro výrobu velmi namáhaných forem. Hlavním cílem této diplomové práce bylo porovnat pět dvoubřitých monolitních stopkových fréz ze SK s kulovým zakončení o průměru 12mm s etalonovým nástrojem, přičemž rozdíly byly v chemickém složení a zrnitosti slinutého karbidu, a nadeponované tenké vrstvě. Obráběným materiálem byla kalená a popuštěná nástrojová ocel 19436 o tvrdosti 64HRC.

Provedeným experimentem bylo zjištěno, že při obrábění nástrojové oceli 19 436 má mnohem větší trvanlivost nástroj z jemnozrnného karbidu, než z hrubozrnného karbidu. Etalonový nástroj měl přibližně dvakrát vyšší trvanlivost než ostatní testované nástroje, ovšem je také přibližně dvakrát dražší. Proto lze říci, že testovaný jemnozrnný karbid je konkurenceschopný. Ovšem díky dvojnásobné trvanlivosti etalonového nástroje lze snížit čas na výměnu nástroje a tím je nástroj produktivnější a tím i za určitých okolností výhodnější.

Díky ekonomickému hodnocení bylo zjištěno, že rozdíl mezi nástrojem s nejdelší a nejkratší trvanlivostí je 806Kč na odebrání 1cm^3 , což činí úsporu nákladů přibližně o 80%. K tomu je nutno přičíst ještě náklady na vyšší počet výměn opotřebovaných nástrojů.

V provedeném experimentu bylo také zjištěno, že pro obrábění takto tvrdé oceli je hospodárnější použít vrstvu Marwin SI než vrstvu Triple Coating. Tento fakt by bylo lepší ještě dále prozkoumávat z důvodu nejednoznačnosti výsledků.

Kromě vysoké produktivity obrábění je v této diplomové práci brán velký ohled na kvalitu obrobenej plochy a to z důvodu velké časové a ekonomické náročnosti dodatečných operací jako je např. broušení či leštění.

Tento požadavek nejlépe splňuje etalonový nástroj zejména díky negativnímu úhlu čela, který má vysoký příznivý vliv na redukci vznikajících vibrací a stabilitu řezného procesu.

V této práci je také zpracován jistý postup pro navržení experimentu. Tento postup se skládá ze dvou částí a to z krátkodobé zkoušky podle A.S Kondratova a z dlouhodobé zkoušky trvanlivosti. Pomocí krátkodobé zkoušky trvanlivosti je zjištěna řezná rychlost pro trvanlivost $T=15\text{min}$. Z těchto řezných rychlostí je stanovena průměrná hodnota řezné rychlosti. Tato řezná rychlost je poté použita v dlouhodobé zkoušce trvanlivosti.

Kromě hodnotící hodnoty v_{15} je také sestavena závislost $VB_{Nstf}=f(t)$. Tato závislost je ovlivněna zvyšující řeznou rychlostí a tím i zvyšující se teplotou obrábění. Při porovnání této závislosti $VB_{Nstf}=f(t)$ při krátkodobé a dlouhodobé zkoušce je zde patrná velká podobnost

sledované závislosti. Proto lze konstatovat, že tento postup byl volen správně a má velkou vypovídající hodnotu i při malém počtu opakování. Při tomto experimentu bylo dosaženo snížení nákladů na samotný experiment a to zejména kvůli nízké spotřebě obráběného materiálu, nízké spotřebě nástrojů a také úspoře času na stroji. Z těchto zmíněných důvodů lze konstatovat, že tento postup provedení experimentu by mohl být v praxi hojně využíván.

Seznam obrázků:

Obr.2.1a Rozsah tvrdosti pro hlavní druhy tvrdých materiálů[13].....	12
Obr.2.1b Struktura martenzitu[16].....	13
Obr.2.1c Teploty kalení ocelí[16].....	13
Obr.2.1d Závislost tvrdosti oceli 19573 v závislosti na popouštěcí teplotě[16].....	13
Obr.2.1e Závislost tvrdosti oceli na obsahu uhlíku[14].....	14
Obr.2.1f Rozdělení a značení nástrojových ocelí[16].....	14
Obr.2.2 Konstrukční provedení nástroje[17].....	17
Obr.2.2.1.1 Efektivní řezná rychlost[17].....	19
Obr.2.2.1.1.1 Hrubování nástroji s kruhovou destičkou[10].....	20
Obr.2.2.1.1.3 Způsoby najíždění do řezu[10].....	22
Obr.2.2.1.1.4a Vlečení nástroje[9].....	23
Obr.2.2.1.1.4b Příklad použití vlečení nástroje[11].....	23
Obr.2.2.2.1a Porovnání teplot při PVD, PACVD a CVD metodách deponování[16].....	24
Obr.2.2.2.1b Princip PVD a CVD metody deponování[16].....	25
Obr.2.2.2.1.1 Princip magnetového naprašování[16].....	26
Obr.2.2.2.2 Struktura vrstvy Triple Coatings[18].....	29
Obr.3.1.1a Nástroje 1-5.....	30
Obr.3.1.1b Nástroj 6.....	31
Obr.3.1.2.1 CNC frézovací centrum MCV 750 A.....	32
Obr.3.1.2.2 Hydraulický upínač nástrojů.....	33
Obr.3.1.3.1 Optický mikroskop Multicheck PC 500.....	33
Obr.3.1.3.2 Optický mikroskop Infinite Focus G4.....	34
Obr.3.2a Obráběný polotovár.....	35
Obr.3.2b Upínací otvory polotovaru.....	35
Obr.3.2c Navržený tvar 1.....	35
Obr.3.2d Navržený tvar 2.....	35
Obr.3.2e Navržený tvar 3.....	36
Obr.3.2f Strategie obrábění.....	36
Obr.3.2.1a Vylomení obou břitů.....	37
Obr.3.2.1b Vylomení jednoho břitu.....	37
Obr.3.2.2.2.2a Nástroj 1.....	43
Obr.3.2.2.2.2b Nástroj 2.....	43

Obr.3.2.2.2.2c Nástroj 3.....	44
Obr.3.2.2.2.2d Nástroj 4.....	44
Obr.3.2.2.2.2e Nástroj 5.....	44
Obr.3.2.3.3.1a Nástroj 1 po 14 a 36 minutách obrábění.....	46
Obr.3.2.3.3.1b Nástroj 2 po 14 a 36 minutách obrábění.....	46
Obr.3.2.3.3.1c Nástroj 3 po 14 a 33 minutách obrábění.....	47
Obr.3.2.3.3.1d Nástroj 4 po 14 minutách obrábění.....	47
Obr.3.2.3.3.1e Nástroj 5 po 8 minutách obrábění.....	47
Obr.3.2.3.3.1f Nástroj 6 po 14 a 36 minutách obrábění.....	47
Obr.3.2.3.3.1a Velký úhel opásání.....	48
Obr.3.2.3.3.2a Povrch obrobený nástrojem 1.....	49
Obr.3.2.3.3.2b Povrch obrobený nástrojem 2.....	49
Obr.3.2.3.3.2c Povrch obrobený nástrojem 3.....	49
Obr.3.2.3.3.2d Povrch obrobený nástrojem 4.....	50
Obr.3.2.3.3.2e Povrch obrobený nástrojem 5.....	50
Obr.3.2.3.3.2f Povrch obrobený nástrojem 6.....	50
Obr.3.2.3.3.2g Drsnost po obrobení nástroji 1.....	51
Obr.3.2.3.3.2h Drsnost po obrobení nástrojem 6.....	51
Obr.3.2.3.3.2i Obrobený polotovar po dlouhodobé zkoušce.....	52
Obr.4 Povrch po obrobení nástrojem 6.....	54

Seznam grafů:

Graf.3.2.2.2.1a Závislost $VB_{Nstř}=f(t)$	39
Graf.3.2.2.2.1b Závislost $I=f(v_c)$ – Nástroj 1.....	40
Graf.3.2.2.2.1c Závislost $I=f(v_c)$ – Nástroj 2.....	40
Graf.3.2.2.2.1d Závislost $I=f(v_c)$ – Nástroj 3.....	41
Graf.3.2.2.2.1e Závislost $I=f(v_c)$ – Nástroj 4.....	42
Graf.3.2.2.2.1f Závislost $I=f(v_c)$ – Nástroj 5.....	42
Graf.3.2.3.3 Závislost $VB_{Nstř}=f(t)$	46
Graf.4.1.1.1 Odebraný materiál při krátkodobé zkoušce.....	55
Graf.4.1.1.2 Náklady na obrábění při odebrání 1 cm^3	56
Graf.4.1.2.1 Odebraný materiál při dlouhodobé zkoušce.....	56
Graf.4.1.2.2 Náklady na obrábění při odebrání 1 cm^3 při dlouhodobé zkoušce.....	57

Seznam tabulek:

Tab.2.1.1a Závislost tvrdosti na kalící teplotě.....	15
Tab.2.1.1b Závislost tvrdosti na popouštěcí teplotě.....	15
Tab.2.1.1c Chemické složení oceli 19 436.....	15
Tab.2.1.1d Chemické složení oceli DIN X210Cr12.....	15
Tab.2.2.2.2 Porovnání druhů vrstev.....	29
Tab.3.1.1a Geometrie nástrojů 1-5.....	31
Tab.3.1.1b Drsnost na hřbetě nástrojů 1-5.....	31
Tab.3.1.1c Geometrie nástroje 6.....	32
Tab.3.2 Naměřené hodnoty tvrdosti polotovarů.....	34
Tab.3.2.2.2 Naměřené hodnoty z krátkodobé zkoušky.....	39
Tab.3.2.2.2.1 Porovnání řezných rychlostí pro trvanlivost břitu T=15min.....	43
Tab.3.2.3.2. Naměřené hodnoty z dlouhodobé zkoušky.....	45
Tab.3.2.3.3.2a Tabulka drsnosti povrchu.....	51
Tab.3.2.3.3.2b Tabulka tvrdosti obrobeného povrchu.....	52
Tab.4.1.1.1 Odebraný materiál při krátkodobé zkoušce.....	55
Tab.4.1.1.2 Náklady na obrábění při odebrání 1 cm ³	55
Tab.4.1.2.1 Odebraný materiál při krátkodobé zkoušce.....	56
Tab.4.1.2.2 Náklady na obrábění při odebrání 1 cm ³	57

Literatura:

- [1] - <<http://www.mmspektrum.cz>> [cit. 2013-02-11].
- [2] - <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/HMT-K/04-Nastrojove%20oceli.pdf>>
[cit. 2013-03-15].
- [3] - <<http://www.carbide.cz/sluzby/povlaky>> [cit. 2013-05-11].
- [4] - <http://www.taegutec.cz/innotool/prirucka_obrazeni_331> [cit. 2013-03-20].
- [5] - ŘEHOŘ, J., přednášky z předmětu Teorie obrábění
- [6] - PŘÍKRYL, Z., MUSÍLKOVÁ, R.: *Teorie obrábění*, SNTL Praha, 1982
- [7] - <http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serial/rezne-nastroje/rezne-nastroje-12_8524.html> [cit. 2013-03-21].
- [8] - <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/application_overview/profile_milling/application_checklist/pages/true-cutting-speed.aspx>
[cit. 2013-03-29].
- [9] - <<http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovaci-strategie-pri-vyrobe-forem-a-zapustek.html>> [cit. 2013-03-29].
- [10] - SKOPEČEK, T. Příspěvek k optimalizaci obrábění forem a zápustek z tepelně zpracovaných nástrojových ocelí "HSC - tvrdé frézování", 2005. 114 s. Západočeská univerzita v Plzni. Dizertační práce.
- [11] - OTÁHAL, D. Progresivní metody frézování a jejich vliv na proces řezání. [s.l.], 2007. 98 s. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Fakulta strojní. Dizertační práce.
- [12] - <http://www.czspos.cz/akce/20100225.emo2009/24_technologie_obrazeni.pdf>
[cit. 2013-04-9].
- [13] - BUKAČEK, Z. Technologie obrábění tvrdých materiálů nástroji s definovanou geometrií břitu. 2009. 9s. Vysoké učení technické v Brně. Diplomová práce
- [14] - Tepelné zpracování oceli - teorie URL:<http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_tepelne_zprac_oceli/teorie2.htm>. [cit. 2013-4-28]
- [15] - SKÁLOVÁ, J., KOUTSKÝ, J., MOTYČKA, V. Nauka o materiálech, 2008. 110s. Západočeská univerzita v Plzni. [cit. 2013-04-30].
- [16] - KŘÍŽ, A., Přednáška z předmětu strojírenské materiály
- [17] - <<http://www.oerlikonbalzerscoating.com/bcz/cze/01-products-services/02-balinit-coatings/indexW3DnavidW261.php>> [cit. 2013-04-9].
- [18] - <<http://www.shm-cz.cz/pvd-povlaky-a-sluzby/pvd-povlaky/triplecoatings-cr>>
[cit. 2013-04-30].