

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

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

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv úpravy ostří na řezný proces při frézování feriticko-martenzitických
ocelí

Autor: **Bc. Jaroslav Krčma**

Vedoucí práce: **Ing. Zdeněk Janda, PhD.**

Akademický rok 2013/2014

1 Západočeská univerzita v Plzni		2 Fakulta strojní				
Katedra technologie obrábění		Akademický rok: 2013/2014				
ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE						
Jméno a příjmení: Bc. J a r o s l a v K r č m a						
Název tématu :		Vliv úpravy ostří na řezný proces při frézování feriticko-martenzitických ocelí				
Pokyny pro vypracování:						
1.	Úvod do problematiky a cíle řešení					
2.	Současný stav řešené problematiky					
3.	Návrh a charakteristika experimentu					
4.	Analýza získaných výsledků					
5.	Závěr					
	Poř. čís.	2.1.1 Jméno diplomanta			Poř. čís.	2.1.2 Jméno diplomanta
2.2	1.			2.3	1.	
	2.				2.	
	3.				3.	
	4.				4.	
	1.				1.	
	2.				2.	
	3.				3.	
	4.				4.	
<i>Poznámka: Tyto tabulky nevyplňujte, slouží pro potřebu katedry</i>						

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 diplomovou práci vypracoval 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 Zákona 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

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Krčma	Jméno Jaroslav		
STUDIJNÍ OBOR	2303T004 „Strojírenská technologie – technologie obrábění“			
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Janda, PhD.	Jméno Zdeněk		
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Vliv úpravy ostří na řezný proces při frézování feriticko- martenzitických ocelí			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2014
----------------	---------	----------------	-----	------------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	66	TEXTOVÁ ČÁST	39	GRAFICKÁ ČÁST	27
---------------	----	---------------------	----	--------------------------	----

STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Diplomová práce se zaměřuje na navržení a experimentální ověření úpravy zaoblení řezné hrany břitu nástroje při dokončovacím frézování oceli P91. Nedílnou součástí práce je sumarizace informací k této problematice.
KLÍČOVÁ SLOVA	korozivzdorné oceli, ocel P91, dokončovací frézování oceli P91, feriticko-martenzitické oceli, úprava mikrogeometrie řezné hrany

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Krčma	Name Jaroslav	
FIELD OF STUDY	2303T004 „Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Janda, PhD.	Name Zdeněk	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	The influence of adjustment the edge on cutting process during milling of ferritic-martensitic stainless steel		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KTO	SUBMITTED IN	2014
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	66	TEXT PART	39	GRAPHICAL PART	27
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This thesis focuses on the design and experimental verification, adjustments rounding cutting edge of the tool edge during the finishing milling P91 steel. Inseparable part of the work is to summarize information on this issue.
KEY WORDS	stainless steel, steel P91, finishing P91 steel milling, , feritic-martensitic steel, modification of cutting edge micro-geometry

Tato diplomová práce vznikla za podpory projektu ESF OP VpK „Posílení spolupráce mezi vysokými školami, výzkumnými ústavy a průmyslovými partnery v Plzeňském kraji - CZ.1.07/2.4.00/17.0052“. Tento projekt napomohl při propojení výstupů diplomové práce mezi aplikačním a akademickým prostředím.

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Zdeňku Jandovi PhD. a konzultantce Ing. Jaroslavě Fulemové za odborné vedení, cenné rady a pomoc při zpracovávání této práce.
Dále bych rád poděkoval mé rodině za podporu během studia.

Obsah

Obsah.....	7
Přehled použitých označení a jednotek	9
1 Úvod.....	11
1.1 Cíle řešení	11
2 Současný stav řešené problematiky.....	12
2.1 Rozdělení korozivzdorných ocelí	12
2.1.1 Austenitická korozivzdorná ocel [3]	12
2.1.2 Martenzitická korozivzdorná ocel [3,4]	13
2.1.3 Feritická korozivzdorná ocel [3,4]	14
2.1.4 Austeniticko-feritická korozivzdorná ocel [3]	15
2.1.5 Feriticko-martenzitická korozivzdorná ocel [5,6].....	16
2.2 Obrobitelnost korozivzdorných ocelí [7,8,9].....	17
2.2.1 Obrobitelnost feritických a martenzitických korozivzdorných ocelí [7,8,9]	18
2.2.2 Obrobitelnost austenitických korozivzdorných ocelí [7,8,9]	18
2.2.3 Obrobitelnost dvoufázových korozivzdorných ocelí [7,8,9].....	19
2.3 Ocel P91[10,11,13].....	19
2.3.1 Vliv legujících prvků na ocel P91 [13,14,15]	20
2.3.1.1 Chrom [13].....	20
2.3.1.2 Molybden [13]	20
2.3.1.3 Vanad [13]	20
2.3.1.4 Niob [13].....	21
2.3.2 Mechanické vlastnosti a tepelné zpracování oceli P91 [13,16]	21
2.4 Opatření nástroje [18].....	22
2.5 Vliv úpravy břitu a povrchu řezného nástroje [20,23].....	24
2.5.1 Kartáčování [24,20].....	26
2.5.2 Magnetické leštění [24,20]	27
2.5.3 Omílání [23,24]	28
2.5.4 Mikro-otryskávání proudem abraziva - MOPA [20, 25, 23, 24, 17].....	30
2.5.5 Úprava laserovým paprskem [27,20]	33
3 Návrh a charakteristika experimentu.....	35
3.1 Experimentální vybavení	36
3.1.1 Stroj	36
3.1.2 Nástroj	37
3.1.2.1 Frézovací hlava	37
3.1.2.2 Vyměnitelná břitová destička	38
3.2 Měřicí vybavení.....	39
3.2.1 Drsnoměr Mahr MarSurf M300	39
3.2.2 Mikroskop Blickle MULTICHECK PC 500.....	40
3.2.3 Dynamometr Kistler s příslušenstvím	41
3.3 Experimentální záběrové podmínky a pravidla pro měření sledovaných veličin.....	42
3.3.1 Experimentální záběrové podmínky.....	42
3.3.2 Pravidla pro měření sledovaných veličin	43
4 Analýza získaných výsledků	44
4.1 Statistické vyhodnocení výsledků [30,31].....	44
4.2 Pre-experiment.....	45
4.2.1 Trvanlivost řezného nástroje	46
4.2.2 Drsnost	48

4.2.3	Celkové silové zatížení nástroje	48
4.2.4	Efektivní řezný výkon na vřetenu stroje	49
4.2.5	Porovnání výsledků pre-experimentu.....	50
4.3	Experiment.....	50
4.3.1	Trvanlivost řezného nástroje	51
4.3.2	Drsnost	53
4.3.3	Celkové silové zatížení nástroje	54
4.3.4	Efektivní řezný výkon na vřetenu stroje	55
4.3.5	Porovnání výsledků experimentu	56
4.3.6	Porovnání sledovaných úprav nástroje s nástrojem konkurenčního výrobce	57
5	Závěr.....	61
	Použitá literatura	62
	Seznam obrázků	64
	Seznam tabulek	66
	PŘÍLOHA č. 1	67

Přehled použitých označení a jednotek

OZNAČENÍ	JEDNOTKY	NÁZEV VELIČINY
a_p	mm	axiální hloubka řezu
a_e	mm	šířka řezu
v_c	m/min	řezná rychlost
n	ot/min	otáčky
f_z	mm/zub	posuv na zub
R_a	μm	střední aritmetická úchylka profilu
t	min	čas
T	$^{\circ}\text{C}$	teplota
p	MPa	tlak
A_5	%	tažnost
D	mm	průměr frézy
z	ks	počet kusů
F_x	N	složka řezné síly ve směru X
F_y	N	složka řezné síly ve směru Y
F_z	N	složka řezné síly ve směru Z
KB	μm	šířka opotřebení na čele nástroje
VB_N	μm	šířka opotřebení na hřbetu nástroje
P_{ef}	%	efektivní řezný výkon na vřetenu
P_j	kW	jmenovitý výkon stroje
T	min	trvanlivost
r_N	μm	poloměr zaoblení ostří
v_f	mm/min	posuvová rychlost
F	N	celkové silové zatížení
V	m^3	objem odebraného materiálu

Seznam použitých zkratk

VBD	Vyměnitelná břitová destička
C	Uhlík
Cr	Chrómový
Ni	Nikl
Mo	Molybden
V	Vanad
Mn	Mangan
Si	Křemík
ISO	International standart organization-mezinárodní organizace pro normalizaci
USA	United States of Americe – Spojené státy americké
ČSN	Česká státní norma
°C	Stupeň celsia
P	Fosfor
Al	Hliník
N	Dusík
Nb	Niob
ARA	diagram anizotermického rozpadu austenitu
SK	slinutý karbid
MOPA	Mikropískování proudem abraziva
YAG	Generující médium pro lasery
ASME	Americká norma
JIS	Japanesse Industrial Standart
NC	Numerical control
P91	Obchodní označení oceli X12CrMoVNbN9-1
Si ₃ N ₄	Nitrid křemičitý
IN2004	Obchodní označení řezného materiálu
IN04S	Obchodní označení řezného materiálu

1 Úvod

Současný vývoj moderní energetiky přináší zvýšené nároky na energetickou účinnost a dopad na životní prostředí. Je několik možností, jak tohoto docílit. Jedním z nich je zvýšení provozní teploty na hodnotu přes 600°C a zvýšení tlaku pracovního média přes 25 MPa. Díky těmto zvýšením je nutné klást vyšší požadavky na konstrukční materiály parních turbín. Poslední dobou se většina výrobců v energetickém průmyslu snaží přeorientovat na takovéto materiály. Jednou z vhodných voleb jsou feriticko-martenzitické oceli.

Feriticko-martenzitické oceli patří k materiálům s výrazně lepší odolností proti korozi, vyšší tepelnou vodivostí a nižším koeficientem tepelné roztažnosti. Obrobitelnost feriticko-martenzitických ocelí je však značně problematická a to zejména díky vysokému obsahu legujících prvků. [1]

Díky chemickému složení těchto ocelí je nutné zvolit řezné podmínky, kterými jsme schopni docílit požadované přesnosti a drsnosti povrchu, oproti běžným řezným podmínkám volených pro běžnější typy ocelí. Složitost obrábění feriticko-martenzitických ocelí je způsobena nejen obsaženým množstvím chromu, ale také kombinací struktury měkkého feritu a tvrdého martenzitu. V současnosti jsou tyto materiály využívány v energetickém průmyslu pro výrobu těles parních turbín a pro výrobu reaktorů pro jaderné elektrárny třetí generace. Intenzivní výzkum po celém světě vyvíjí nový typ reaktorů jaderných elektráren, a to reaktory čtvrté generace. Čtvrtá generace reaktorů má vysoké nároky na spolehlivost, ekonomičnost, bezpečnost a udržitelnost. I přes vysoké nároky se předpokládá, že využití feriticko-martenzitických ocelí pro komponenty jaderných elektráren v budoucnu, je perspektivnější než použití austenitických ocelí. [2]

1.1 Cíle řešení

Diplomová práce má za hlavní cíl navržení a experimentální ověření úpravy mikrogeometrie řezné hrany tak, aby byly maximálně plněny požadavky kladené na řezný proces a na jeho výsledky. Druhým cílem práce je sumarizace informací a získání teoretických podkladů k sledované problematice.

Sumarizace informací je rozdělena na informace o korozi-vzdorných ocelích obecně, informace o obráběné oceli P91 a informace o úpravách zaoblení řezné hrany břítu.

Experimentální část se skládá z pre-experimentu, kde byla nalezena nejvhodnější řezná rychlost a z následného experimentu, kde byla navržena a ověřena nejvhodnější úprava zaoblení řezné hrany břítu. V předcházející práci projektu SGS-2012-023 Efektivní frézování těžkoobrobitelných feriticko-martenzitických ocelí (Jan Petele: Efektivní frézování feriticko-martenzitických ocelí - vliv mikrogeometrie nástroje na řezný proces) byl nalezen nejvhodnější poloměr zaoblení řezné hrany břítu.

2 Současný stav řešené problematiky

2.1 Rozdělení korozivzdorných ocelí

V následujících podkapitolách jsou nejdříve rozděleny korozivzdorné oceli. Feriticko-martenzitické oceli patří do skupiny takzvaných dvoufázových ocelí.

2.1.1 Austenitická korozivzdorná ocel [3]

Nejčastější použití austenitických korozivzdorných ocelí je v potravinářském průmyslu. Název austenitické je odvozen od austenitické struktury, kterou tyto oceli dosahují jak za normální teploty, tak za teploty pod bodem mrazu. Austenitickou strukturu zajišťuje dostatek austenitotvorných prvků, z nichž lze například vyjmenovat nikl, mangan, uhlík či dusík.

Obvyklé složení austenitických korozivzdorných ocelí	
Uhlík [C] :	méně než 0,10 %
Chrómový [Cr] :	16–22 %
Níkl [Ni] :	8–40 %
Molybden [Mo] :	0–5 %
Příklady možných dalších příměsí prvků :	dusík, titan, niob, měď, křemík

Tab.1: Obvyklé složení austenitických korozivzdorných ocelí [3]

Austenitické korozivzdorné oceli mají poměrně nízkou mez kluzu 230–300 MPa, ale vysokou houževnatost až 240 J.cm² při -196 °C. Tažnost austenitických korozivzdorných ocelí se pohybuje mezi 45–65 %, díky tomu jsou vhodné ke tváření za studena. Po tváření za studena lze dosáhnout meze kluzu až 510–960 MPa, avšak dochází k odpovídajícímu snížení tažnosti na 25–8 %.

Jsou nemagnetické, ale zbytkový obsah 3–10 % feritu δ může způsobovat slabý feromagnetismus. Z pohledu korozivzdornosti odolávají celkové korozi za přispění chrómu, molybdenu, mědi, křemíku a niklu. Mezikystalové korozi odolávají stabilizací titanem, případně niobem. Bodové a štěrbinové korozi odolávají za příměsí molybdenu, křemíku a dusíku. Koroznímu praskání odolávají za omezení obsahu fosforu, arzenu, antimonu popř. cínu. Jsou náchylné ke korozi pod napětím. Austenitických ocelí se však vyrábějí desítky druhů v následujících třech základních skupinách:

Tři základní skupiny austenitických korozivzdorných ocelí			
Skupina austenitické korozivzdorné oceli	Chrómový-níkl	Chrómový-mangan-níkl	Chrómový-mangan
Složení:	0,01–0,15 % uhlíku, 12–25 % chrómu, 8–38 % niklu	0,02–0,15 % uhlíku, 12–22 % chrómu, 5–12 % manganu, 3–8 % niklu	0,02–0,08 % uhlíku, 10–18 % chrómu, 14–25 % manganu, 3–8 % niklu
Případné další legury:	dusík, molybden, měď, křemík a stabilizované titanem a niobem	dusík, molybden a měď, stabilizované titanem a niobem	dusík, molybden a měď, stabilizované titanem a niobem

Tab.2: Tři základní skupiny austenitických korozivzdorných ocelí [3]

Typickým představitelem austenitických korozivzdorných ocelí jsou oceli s obsahem uhlíku 0,08 %, 18 % chrómu a 8 % resp. 10 % niklu. Oceli o tomto složení se často používají v potravinářském průmyslu, kde se výrobky z nich označují 18/8 resp. 18/10. Jejich velkou výhodou je velmi dobrá odolnost vůči korozi způsobené roztoky solí, masem či krví.

2.1.2 Martenzitická korozivzdorná ocel [3,4]

Martenzitická korozivzdorná ocel s obsahem chrómu od 12 do 18 % a až 1,5 % uhlíku je schopna zakalení z austenitizační teploty, tj. nad linií GSE v binárním diagramu železo-uhlík. Chróm jako feritotvorný prvek snižuje kritickou rychlost ochlazování při anizotropickém rozpadu austenitu (tzn. že dochází k zakalení i na vzduchu).

Martenzitické korozivzdorné oceli lze po kalení i žíhat mezi teplotami 600–750 °C. Pokud není požadována houževnatost či tažnost materiálu, zušlechťováním lze dosáhnout pevnost v tahu až 2 000 MPa. Martenzitické korozivzdorné oceli můžeme také precipitačně vytvrdit či zpevnit legováním mědí, titanem, niobem, hliníkem či molybdenem, avšak při obsahu uhlíku do 0,1 %. Martenzitické korozivzdorné oceli jsou feromagnetické.

Obvyklé složení martenzitických korozivzdorných ocelí	
Uhlík [C] :	do 1,5 %
Chróm [Cr] :	až 18%.
Nikl [Ni] :	až 6,5 %
Molybden [Mo] :	Až 2,25 %
Příklady možných dalších příměsí prvků :	dusík, titan, vanad, měď

Tab.3: Obvyklé složení martenzitických korozivzdorných ocelí [4]

Nejčastěji používané martenzitické korozivzdorné oceli (s ohledem na dobré mechanické vlastnosti a vysokou korozní odolnost) jsou s obsahem uhlíku do 0,15 % a obsahem chrómu 11,5 až 13,5 %. Pro účel výroby nožů jsou používány oceli s obsahem uhlíku od 0,2 do 0,4 % a chrómu od 12 do 14,5 %. Podmínkou je však zachování dostatečné tažnosti a tvrdosti. Oceli s obsahem uhlíku od 0,6 do 1,5 % a chrómu od 16 do 18 % sice dosahují vyšší tvrdosti, avšak na úkor korozivzdornosti. Chromniklové oceli s obsahem niklu nad 2 % obsahují zvýšený obsah chrómu na 16–18 % v závislosti na obsahu uhlíku či jiných feritotvorných prvků jako chróm, křemík, molybden či další. S tímto složením lze získat materiál dostatečné pevnosti a tažnosti zároveň. Oceli s obsahem uhlíku do 0,05 %, 13 – 16 % chrómu a 3–6 % niklu je možné popouštět a získat tak martenziticko-austenitickou strukturu s dobrou svařitelností.

Tři základní skupiny martenzitických korozivzdorných ocelí			
Skupina martenzitické korozivzdorné oceli	Martenzitické bez obsahu Ni	Martenzitické chromové oceli s niklem	Supermartenzitické oceli
Složení:	0,15–0,45 % uhlíku, 13 % chrómu	0,2 % uhlíku, 17 % chrómu, 2% niklu	pod 0,015 % uhlíku, 11–13 % chrómu, 2-2,25 % molybdenu, 5,5–6,5 % niklu, Velmi nízký obsah síry
Doplňující informace:	další možné legury- molybden, wolfram, vanad	Používají se pro lopatky parních turbín a dalších součástí přicházejících do styku s vodou, párou či dokonce mořskou vodou.	Vysoká pevnost, zlepšená houževnatost a dobrá svařitelnost. Použití zejména pro potrubí při těžbě agresivních plynů a jejich transportu.

Tab.4: Tři základní skupiny martenzitických korozivzdorných ocelí [4]

2.1.3 Feritická korozivzdorná ocel [3,4]

Feritické korozivzdorné oceli se vyznačují strukturou feritu α . Této struktury jsou schopné dosáhnout při teplotách tepelného zpracování od 750 do 900 °C. Nedosáhnou přeměny na austenit a tím pádem nejsou schopné zakalení na martenzitickou strukturu. Feritické korozivzdorné oceli nejsou kalitelné. Jejich pevnost je větší než u nelegované uhlíkaté oceli. Nevýhodou feritických korozivzdorných ocelí je náchylnost ke křehnutí při vysokých teplotách (nad 900°C).

Obvyklé složení feritických korozivzdorných ocelí	
Uhlík [C] :	pod 0,1 %
Chróm [Cr] :	13 - 30%.
Příklady možných dalších příměsí prvků :	Mohou být legované například molybdenem a stabilizované titanem

Tab.5: Obvyklé složení feritických korozivzdorných ocelí [4]

Feritické korozivzdorné oceli lze rozdělit podle chemického složení následovně:

Tři základní skupiny feritických korozivzdorných ocelí			
Skupina feritické korozivzdorné oceli	13% chromové feritické oceli	17% chromové feritické oceli	25% chromové feritické oceli
Složení:	0,08 % uhlíku, 11,5-13,5 % chrómu	pod 0,08 % uhlíku, 16-18 % chrómu, 2% niklu	0,1 – 0,2 % uhlíku, 25 % chrómu,
Doplňující informace:	Dobrá korozní odolnost v atmosféře, ve vodě a vodní páře, v zředěné kyselině dusičné a slabých organických kyselinách.	Mohu být legované molybdenem případně stabilizované titanem.	Použití za vysokých teplot.
Rozvoj metalurgie umožnil vyrobit ocel s čistě feritickou strukturou s velmi nízkým obsahem intersticiálních prvků (C + N). Nazývají se superferity Základním legujícím prvkem je 18 - 29% Cr. Součet obsahu C + N se pohybuje mezi 0,015 až 0,025 %. Superferity jsou obvykle ještě stabilizovány Ti nebo Nb.			

Tab.6: Základní skupiny feritických korozivzdorných ocelí [3,4]

Při křehnutí dochází k uvolňování uhlíku z karbidů při vzniku austenitu a po ochlazení se tvoří martenzitická struktura. Při obsahu chrómu od 15 do 30 % vzniká fáze σ a to za působení teplot 600–800 °C či zkřehnutím za teploty 475 °C při kterém dochází ke snížení tažnosti a houževnatosti materiálu například při svařování. Při ohřevu nad 900 °C můžeme dosáhnout austenitu a při následném ochlazení částečně martenzitické struktury při obsahu chrómu v rozmezí 13- 16 %. Tyto oceli se pak nazývají poloferitické. Použití feritických korozivzdorných ocelí je zejména v potravinářském průmyslu a to jen do slabých korozivních prostředí (zelenina, suché potraviny, ovoce, apod.).

2.1.4 Austeniticko-feritická korozivzdorná ocel [3]

Austeniticko-feritické korozivzdorné oceli obsahují jak podíl fáze austenitu, tak feritu δ . Ten se v těchto ocelích vyskytuje v rozmezí 30 - 50 %. Podíl závisí na celkovém objemu austenitotvorných a feritotvorných prvků. Dvoufázová směs umožňuje vznik jemnějšího zrna ve fázi austenitu a ve fázi feritu δ . Vznikem této dvoufázové oceli (v některých literaturách jsou dvoufázové oceli označovány také jako duplexní) můžeme dosáhnout dobré svařitelnosti, dostatečné houževnatosti, vyšší meze kluzu (400–500 MPa) a zvýšení korozní odolnosti pod napětím. Při podílu feritu δ 40 - 50 % můžeme získat optimální mechanické vlastnosti z hlediska pevnosti a houževnatosti. V případě legování molybdenem, mědí či dusíkem můžeme dosáhnout vysoké korozní odolnosti zejména proti mezikrystalové, bodové a šterbinové korozi. Díky tomu můžeme austeniticko-feritické oceli použít také v prostředí kyseliny sírové a fosforečné, mořské vody a v chloridech.

Obvyklé složení austeniticko-feritických korozivzdorných ocelí	
Uhlík [C] :	do 1,5 %
Chróm [Cr] :	22 - 23 %
Níkl [Ni] :	4,5 - 6,5 %
Molybden [Mo] :	3 – 3,5 %

Tab.7: Obvyklé složení austeniticko-feritických korozivzdorných ocelí [3]

Použití austeniticko-feritických korozivzdorných ocelí je omezeno dlouhodobým použitím při teplotách mezi 700 a 1000 °C. Zde pak dochází k vytvrzování a tím pádem i křehnutí vylučováním tzv. fáze sigma a stárnutím (vytvrzováním, křehnutím) při 475 °C (v intervalu teplot 350 až 550 °C).

2.1.5 Feriticko-martenzitická korozivzdorná ocel [5,6]

Feriticko martenzitické oceli patří stejně jako austeniticko-feritické do skupiny dvoufázových korozivzdorných ocelí. Feriticko-martenzitické oceli tvoří skupinu vysoce pevných ocelí pro tváření za studena. Ve své podstatě jsou feriticko-martenzitické oceli nízkouhlíkové materiály (max 0,13 %C) na bázi Mn či Si v menší míře obsahují molybden, chrom či vanad. Feritická matrice je u těchto ocelí zpevněna především substitučně manganem a křemíkem, výjimečně precipitačně.

Dvoufázové feriticko martenzitické oceli mají charakteristickou mikrostrukturu vytvořenou disperzí tvrdé fáze ve feritické matrici. Tvrdou, sekundární fází je obvykle martenzit, ale mohou být přítomné i jiné produkty nízkoteplotní transformace a zbytkový austenit. Struktura feriticko-martenzitických ocelí se skládá z 75 až 90 % polygonálního feritu a 10 až 25 % martenzitu dispergovaného ve feritické matrici. Martenzit může obsahovat jistý podíl zbytkového austenitu, jenž se aktivně podílí na příznivých hodnotách pevnostně plastických charakteristik. Nositelkou plastických vlastností materiálu je feritická matrice. Rozhodující parametr ovlivňující pevnostní hladinu materiálu je objemový podíl martenzitu k vytvrzování.

Obvyklé složení austeniticko-feritických korozivzdorných ocelí	
Uhlík [C] :	0,1 – 0,2 %
Chróm [Cr] :	14 - 18 %
Níkl [Ni] :	1 - 5%
Vanad [V] :	0,2 – 0,3 %
Mangan [Mn] :	0,6 – 1%
Molybden [Mo] :	0,8 – 1,2 %

Tab.8: Obvyklé složení feriticko-martenzitických korozivzdorných ocelí [6]

2.2 Obrobitelnost korozivzdorných ocelí [7,8,9]

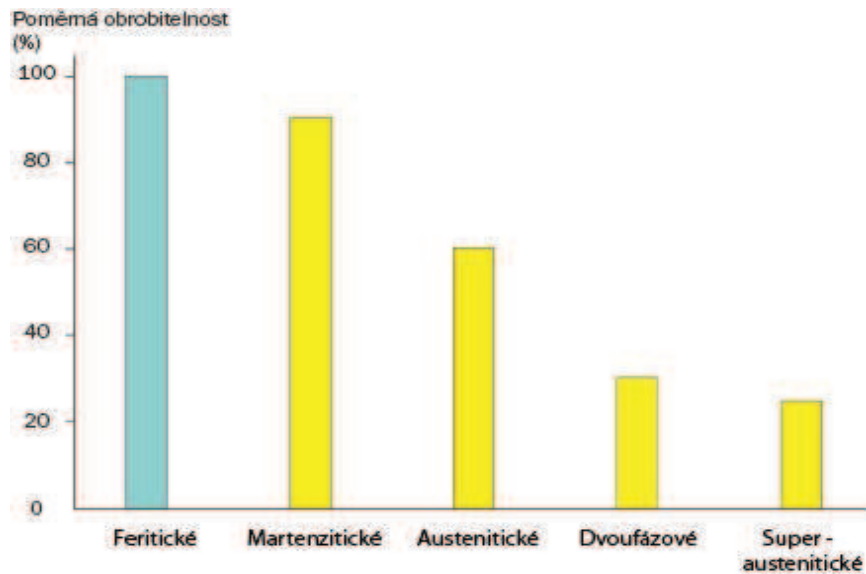
Obrábění korozivzdorných ocelí je díky požadavkům na kvalitní povrch a krátkým životnostem nástrojů problematický proces. Jedním z hlavních problémů, co se týče produktivity obrábění, je stuhovitý tvar třísky. Při obrábění korozivzdorné oceli vznikají velké řezné síly a dochází k mechanickému zpevnování materiálu. V oblasti, která dělí nízké a vysoké rychlosti obrábění dochází při obrábění korozivzdorných ocelí ke vzniku nárůstku. Korozivzdorné oceli mají sklon k opotřebování zejména na hřbetu nástroje, při jejich stabilním houževnatém chování vznikají velké řezné síly a třísky se obtížně láme.

Pro obrobitelnost není zavedeno žádné označení. Jedna z definic říká, že se jedná o schopnost materiálu obrobku být obráběn. Obrobitelnost se určuje převážně praktickými zkouškami. Výsledky jsou pak udány ve vztahu k jiné zkoušce pro jiný materiál za stejných podmínek. Při těchto zkouškách je nutné uvážit i další činitele jako např. životnost nástroje, typ obráběcího stroje, stabilitu upnutí, a další. V kovoobráběcím průmyslu je produkována celá řada součástí vyráběných z různých materiálů. Každý materiál má své specifické vlastnosti, které jsou ovlivňovány několika faktory (tepelným zpracováním, tvrdostí, množstvím přísadových prvků). Tyto faktory mají značný vliv na volbu geometrie, řezných podmínek a třídy obráběcího nástroje. Materiály pro obrábění proto byly rozděleny do šesti hlavních skupin podle normy ISO. Každá z těchto skupin má specifické vlastnosti z hlediska obrobitelnosti.



Obr.1 Materiály pro obrábění dle normy ISO[9]

Obrobitelnost korozivzdorných ocelí je závislá na způsobu výroby oceli, tepelném zpracování a na množství legujících prvků. Obrobitelnost se s rostoucím obsahem legur snižuje. Při obrábění korozivzdorných ocelí se tvoří dlouhé třísky. Na obrázku 2 je znázorněn graf poměrné obrobitelnosti korozivzdorných ocelí, podle firmy Sandvik coromant [7].



Obr.2 Poměrná obrobiteľnosť korozivzdorných ocelí[7]

V následujících podkapitolách je popsána obrobiteľnosť korozivzdorných ocelí podle firmy Sandvik coromant.

2.2.1 Obrobiteľnosť feritických a martenzitických korozivzdorných ocelí [7,8,9]

Obrobiteľnosť feritických a martenzitických ocelí je dobrá a velmi podobná nízkolegovaným ocelím. Relativní obrobiteľnosť feritických korozivzdorných ocelí je až 100%, u martenzitických korozivzdorných ocelí je to 90%. Dle ISO se z pohledu obrobiteľnosti feritické a martenzitické korozivzdorné oceli řadí do skupiny materiálů ISO P. Důvodem je jejich vysoká poměrná obrobiteľnosť a nespádají tak do skupiny ISO M, jako ostatní korozivzdorné oceli. Vzhledem k vysokému obsahu uhlíku je umožněno kalení těchto ocelí. Při obrábění dochází k opotřebení hřbetu řezného nástroje a opotřebení ve tvaru žlábků. Projevují se zde sklony ke tvorbě nárůstku.

2.2.2 Obrobiteľnosť austenitických korozivzdorných ocelí [7,8,9]

Relativní obrobiteľnosť austenitických ocelí je přibližně 60% u super-austenitických dokonce jen 25%. Austenitické korozivzdorné oceli tvoří při obrábění dlouhé, spojitě a houževnaté třísky, které se obtížně dělí. Při obrábění tohoto druhu korozivzdorných ocelí dochází k adheznímu opotřebení nástroje a vzniku nárůstku na břitu (BUE). Austenitické korozivzdorné oceli mají sklon k mechanickému zpevnění při obrábění, to má za následek vznik tvrdých třísek a tvrdý povrch. Dlouhé třísky způsobují opotřebení ve tvaru vrubu. Obrobiteľnosť tohoto typu ocelí lze zvýšit přísadou síry, ale za předpokladu snížení korozivzdornosti.

Firma Sandvik coromant doporučuje pro obrábění austenitických korozivzdorných ocelí použití pozitivní geometrie břitu. Při obrábění těchto ocelí vzniká velké množství tepla, je nutné udržet konstantní hloubku řezu. Pro dosažení co nejlepší obrobiteľnosti musí řez probíhat pod mechanicky zpevněnou vrstvou. Tento typ korozivzdorných ocelí patří do skupiny obrobiteľnosti ISO M.

2.2.3 Obrobitelnost dvoufázových korozivzdorných ocelí [7,8,9]

Poměrná obrobitelnost dvoufázových korozivzdorných ocelí je špatná, dosahuje hodnoty 30% a to zejména v důsledku vysoké meze kluzu a vysoké pevnosti v tahu. Obsah feritu nad 60% přispívá ke zvýšení obrobitelnosti. Při obrábění dvoufázových korozivzdorných ocelí vzniká velké množství tepla. To může mít za následek rychlé opotřebení ve tvaru žlábků a plastickou deformaci. Při obrábění těchto ocelí vznikají pevné třísky, u kterých může dojít k jejich zasekávání a nárůstu rezných sil.

Ve snaze předejít vzniku opotřebení ve tvaru vrubu a tvorbě otřepů se doporučuje použití malého úhlu nastavení ostří. Je nutné dbát na stabilitu upnutí nástroje a obrobku.

2.3 Ocel P91[10,11,13]

V energetickém průmyslu jsou klíčovými užitnými vlastnostmi odolnost proti „creepu“ (tečení) a odolnost proti vysokoteplotní korozi v prostředí vodní páry. Od poloviny roku 1970 se Spojené státy snažily vytvořit nový materiál k překlenutí mezery mezi feritickými a martenzitickými oceli, pro vysoké teploty 540 až 600 ° C. V roce 1980 byl pak nový materiál představen v Oak Ridge National Laboratory (USA).

Ocel nese označení X12CrMoVNb9-1 a je známá zejména pod obchodním označením P91 (9%Cr - 1%Mo). Jedná se o feriticko-martenzitickou ocel mikrolegovanou vanadem, niobem a kontrolovaným obsahem dusíku. Tato ocel s označením dle ČSN 17 119 patří mezi představitele moderních žárovevých ocelí na bázi 9 % Cr, která je modifikovanou variantou oceli ČSN 17 116 lišící se přísadou legur vanadu a niobu. [10]

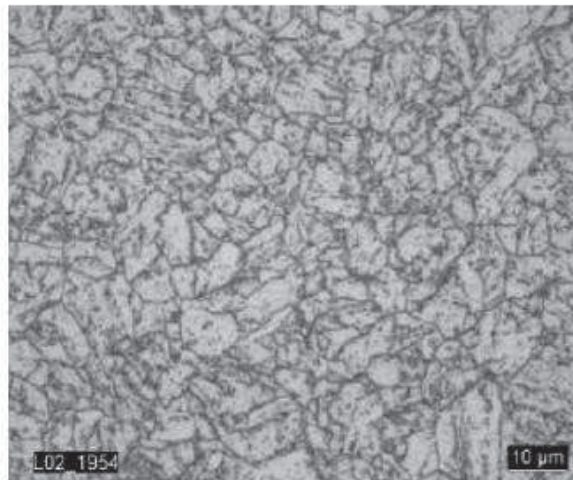
Jedním z důvodů vzniku této oceli je zvyšování účinnosti parních turbín. Dalšími z důvodů jsou ekonomické důvody a zvyšující požadavky na snižování škodlivých emisí. Při zvýšení teploty (okolo 600°C) a tlaku páry (okolo 26MPa) na vstupu do parních turbín stoupne účinnost parní turbíny až na 43% a emise CO₂ klesnou přibližně o 20%. Těchto podmínek lze dosáhnout použitím progresivní oceli odolné vůči „creepu“ a korozi jako je ocel P91.[10]

Chemické složení oceli P91		
Prvek	Min [%]	Max [%]
C	0,08	0,12
Si	0,20	0,50
Mn	0,30	0,60
P	-	0,020
S	-	0,010
Al	-	0,040
Cr	8,0	9,5
Mo	0,85	1,05
Ni	-	0,40
V	0,18	0,25
N	0,030	0,070
Nb	0,06	0,10

Tab.9: Chemické složení oceli P91 [12]

Ocel P91 je určena pro výrobu odlitků, výkovků, plechů a trubek, pro aplikaci při teplotách 550 - 650°C. Zejména se používá v energetickém a petrochemickém průmyslu. V lité formě se používá pro odlitky těles parních turbín, pracujících při teplotě do 600°C. [10]

Z hlediska mikrostruktury je ocel P91 tvořena popouštěným martenzitem a delta feritem maximálně do 1% objemu. Zmíněný delta ferit má příznivý vliv na žárupevnost oceli. Střední velikost zrna se připouští do 100 μm. [13]



Obr.3 Mikrostruktura oceli P91 [13]

2.3.1 Vliv legujících prvků na ocel P91 [13,14,15]

Jak bylo uvedeno v kapitole 2.3 ocel P91 obsahuje několik legujících prvků. V následující podkapitole jsou uvedené některé z legujících prvků a jejich vliv na ocel P91.

2.3.1.1 Chrom [13]

Největším podílem světové produkce chromu je využití v metalografickém průmyslu, zejména při výrobě legovaných ocelí. Přísadou nízkolegovaných ocelí je chrom již od začátku jejich vývoje. Přidával se do molybdenových ocelí ke zvýšení plasticity při porušení tečení, ke zmírnění sklonu ke grafitizaci a ke zlepšení korozní odolnosti. Hlavním důvodem vysoké přísady chromu je požadavek zabezpečení žáruvzdornosti až do teplot kolem 600°C.

2.3.1.2 Molybden [13]

Již od nízkých hodnot molybdenu ve slitině se výrazně zvyšuje její tvrdost, mechanická a korozní odolnost. Vliv molybdenu na vlastnosti oceli P91 je v přímé závislosti na typu a morfologii karbidické fáze. Molybden se rozpouští hlavně ve feritu a díky tomu stoupá žáruvzdornost ocelí.

2.3.1.3 Vanad [13]

Spolu s uhlíkem tvoří vanad karbid vanadu V_4C_3 . Ten má tendenci vylučovat se v jemné disperzní formě díky vysoké aktivační energii difúze vanadu. Díky tomu, že Vanad pomalu hrubne zvyšuje proto žárupevnost oceli. V ocelích s vysokým obsahem chromu se vanad z části rozpouští při nižších koncentracích a může tak vytvářet přednostně karbonitrid morfologicky i distribučně se nelišící od karbidu V_4C_3 . Vliv tohoto karbidu na žárupevnost těchto ocelí je však menší než účinek Lavesových fází.

2.3.1.4 Niob [13]

Niob má na vlastnosti oceli P91 podobný účinek jako vanad. V oceli P91 je však obsažen v menším množství než Vanad (0,06-0,1%). Legování pouze niobem, bez přídavku vanadu, se používá velmi málo. Karbidy niobu a vanadu mohou společně tvořit nepřetržitou řadu tuhých roztoků. V ocelích s vysokým obsahem chromu prokazuje niob zásadní vliv na snížení precipitace a koagulace Lavesovy fáze. Důsledkem toho je zvýšení žárupevnosti.

Lavesovy fáze
Intermediální fáze, jejichž složení lze vyjádřit obecným vzorcem AB_2 .
Vznikají při hodnotách poměru atomu poloměrů složek v rozmezí 1,09–1,34.
Krystalují v krychlové soustavě s 24 atomy v elementární buňce nebo v soustavě šesterečné.
Přítomnost Lavesových fází obvykle zhoršuje mechanické vlastnosti technických materiálů.

Tab.10: Popis Lavesových fází [10,15]

2.3.2 Mechanické vlastnosti a tepelné zpracování oceli P91 [13,16]

Tato ocel se používá zásadně v zušlechtném stavu. Žihání na odstranění vnitřního pnutí se provádí po každé opravě vad a po hrubování. V tomto stavu má ocel P91 vlastnosti pro práci za pokojové teploty i vysokých teplot. Zušlechťování této oceli se skládá z rozpouštěcího žihání (při 1050°C), následném ochlazení na vzduchu a popouštění při žhací teplotě odlitku minimálně 740°C. Vysoký obsah chromu a obsažené legující prvky mají za důsledek posun křivek rozpadu austenitu v ARA diagramech ke dlouhým časům. Díky tomu jsou oceli s vysokým obsahem chromu dobře prokalitelné i v tlustých průřezích při ochlazení na vzduchu. V širokém rozmezí ochlazovacích rychlostí tak vzniká martenzit. Martenzit obsažený v těchto ocelích je převážně laťkový a uvnitř původních austenitických zrn vznikají svazky rovnoběžných martenzitických látek, které mohou být odděleny zbytkovým austenitem.

Teplota oceli [°C]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_5 [%]	Kontrakce Z [%]
20	528	681	30	69
100	476	621	23	73
200	446	578	21	73
300	433	556	21	71
400	416	527	21	68
500	385	455	24	75
600	310	330	30	89
700	178	192	41	96

Tab.11: Mechanické vlastnosti oceli P91 při zvýšené teplotě [13]

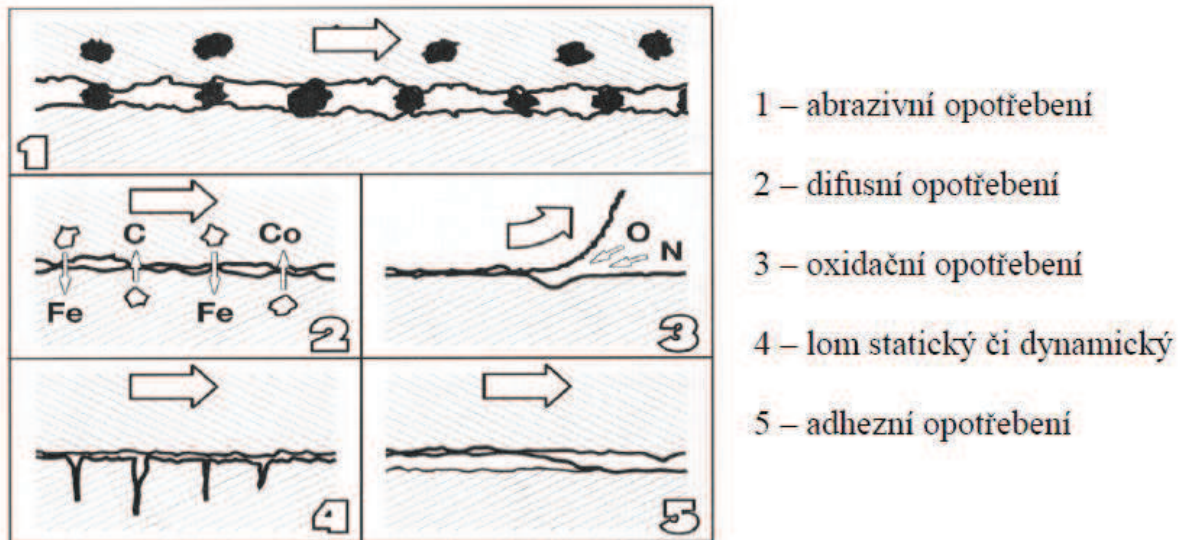
2.4 Opotřebení nástroje [18]

Během procesu obrábění vzniká velké množství tepla, které se vyvíjí na hřbetu a čele řezného nástroje. Tepelné zatížení značně namáhá materiál břitu nástroje a v některých případech vytváří dynamický faktor, kdy jeden břit z materiálu vystupuje a opět do něj vniká. V průběhu procesu utváření třísky se vytváří čistý kovový povrch za vysoké teploty a vysokého tlaku. Povrch má následně sklon k difúzním procesům a chemickým reakcím. Obráběné materiály většinou obsahují tvrdé částice různého druhu, které málokdy dosahují tvrdosti materiálu břitu nástroje. Dochází tak k abrazivnímu efektu.

Kombinace mechanických, chemických, tepelných a abrazivních faktorů způsobuje složité zatěžování břitu nástroje, které se následně projevuje opotřebením nástroje. Základní mechanismy opotřebení nástroje jsou uvedeny v následující tabulce č.12.

Základní mechanismy opotřebení nástroje	
Mechanismus opotřebení	Popis
abraze	brusný oěr vlivem tvrdých mikročástic obráběného materiálu i mikročástic uvolněných z nástroje
adheze	vznik a okamžité následné porušování mikrosvarových spojů na stýkajících se vrcholcích nerovností čela a třísky, v důsledku vysokých teplot a tlaků, chemické příbuznosti materiálů a kovově čistých styčných povrchů
difúze	migrace atomů z obráběného do nástrojového materiálu a naopak, a z ní vyplývající vytváření nežádoucích chemických sloučenin ve struktuře nástroje
oxidace	vznik chemických sloučenin na povrchu nástroje v důsledku přítomnosti kyslíku v okolním prostředí
plastická deformace	důsledek vysokého tepelného a mechanického zatížení, kumulovaného v čase, která se může ve svém nejnejpříznivějším důsledku projevit ve formě tzv. lavinového opotřebení
křehký lom	důsledek vysokého mechanického zatížení, např. přerušovaný řez, nehomogenity a vměstky v obráběném materiálu, atd.

Tab.12: Základní mechanismy opotřebení nástroje [18]



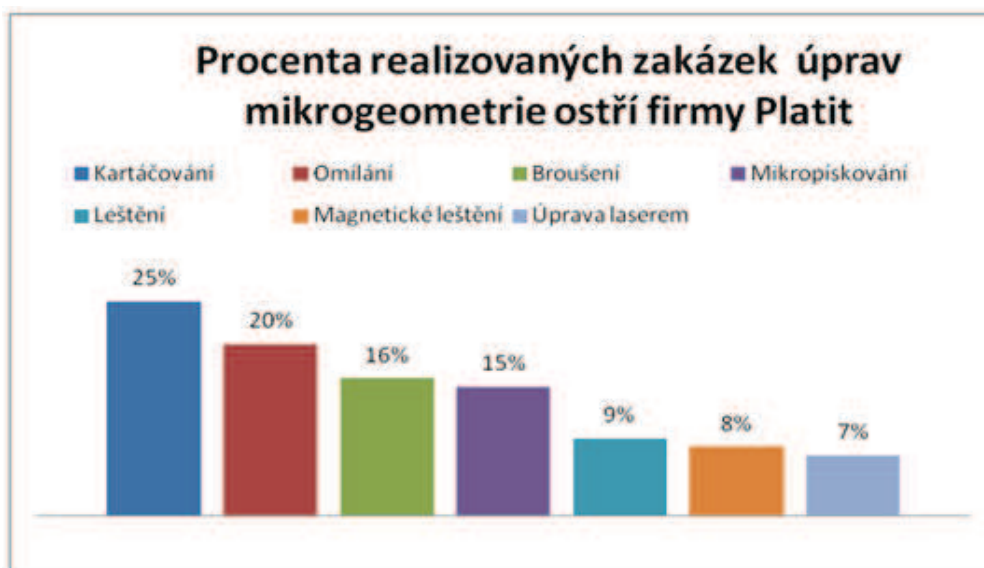
Obr.4 Typy opotřebení [24]

Opotřebení hřbetu	
Žlábkové opotřebení na čele	
Tvorba nárůstku	
Vrubové opotřebení hlavního hřbetu	
Oxidační rýha na vedlejším hřbetu	
Plastická deformace břitu	
Hřebenovitě trhliny	
Křehké porušování břitu	
Destrukce břitu	

Obr.5 Typy opotřebení řezného břitu [19]

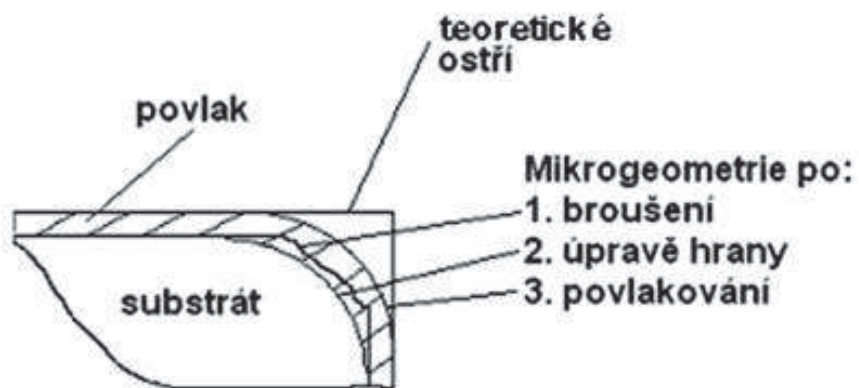
2.5 Vliv úpravy břítu a povrchu řezného nástroje [20,23]

Řezivost obráběcího nástroje ovlivňuje několik faktorů. Na funkčních vlastnostech nástroje se podílí zejména volba vhodného materiálu řezného nástroje, volba povlaku a volba řezné geometrie. Ani jednu ze třech voleb ovlivňující funkční vlastnosti nástroje nelze oddělit, na všechny je nutné nahlížet ve vzájemném kontextu. Řezná geometrie se dělí na makrogeometrii a mikrogeometrii. Mikrogeometrie řezného nástroje je ovlivněna použitým řezným materiálem a také naneseným oteruvzdorným povlakem. Ten díky své tloušťce ovlivňuje poloměr zaoblení břítu a drsnost povrchu. Na obrázku 5 je vyobrazen graf procent realizovaných zakázek úprav mikrogeometrie ostří ve firmě Platit.



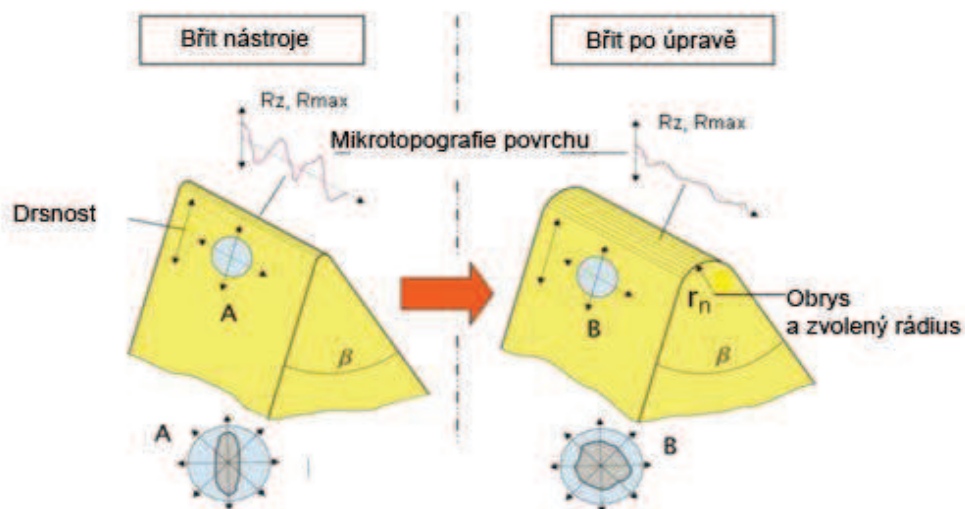
Obr.6 Procenta realizovaných zakázek úprav mikrogeometrie ostří firmy Platit[21]

Tvar břítu se nejčastěji volí podle použití nástroje a podle jeho typu. S rostoucími požadavky na opakovatelnost výroby a homogenitu břítu roste trend používání malého zaoblení ostří a použití fazetky na ostří. Nástroje vyrobené ze SK se vyrábějí slinováním. Při výrobě se málokdy dosáhne ostrého břítu nástroje a vytvoří se tak nepravidelné zaoblení ostří. Na řezném břítu zůstávají otřepy a je tak nutné použít jednu z metod úprav řezných hran. Tvorba břítu je výsledkem několika na sebe navazujících kroků při výrobě nástroje. Jedná se například o broušení a povlakování. Při povlakování je nutné zohlednit, že při nanesení povlakované vrstvy se změní poloměr zaoblení ostří. Je několik metod pro úpravu řezných hran ostří. Nejznámější z nich jsou omílání, kartáčování, pískování, lapování, magnetické leštění, broušení nebo úprava laserem. U většiny z metod se jedná o působení abrazivních částic, jejichž účinek je přenášen vhodným médiem (pojivo, magnet, vzduch, pasta či vlákno). Změnou rychlosti a dobou pohybu obrobku nebo abraziva se vytvoří požadované zaoblení hrany.



Obr.7 Schéma břítu nástroje [23]

Na obrázku 7 je zobrazeno schéma břítu nástroje. Jsou zde zobrazeny základní tvary mikrogeometrie ostří vzniklé po broušení (1.), úpravě řezné hrany (2.) a po povlakování (3.). Jedná se o jednotlivé stupně úpravy před povlakování VBD.



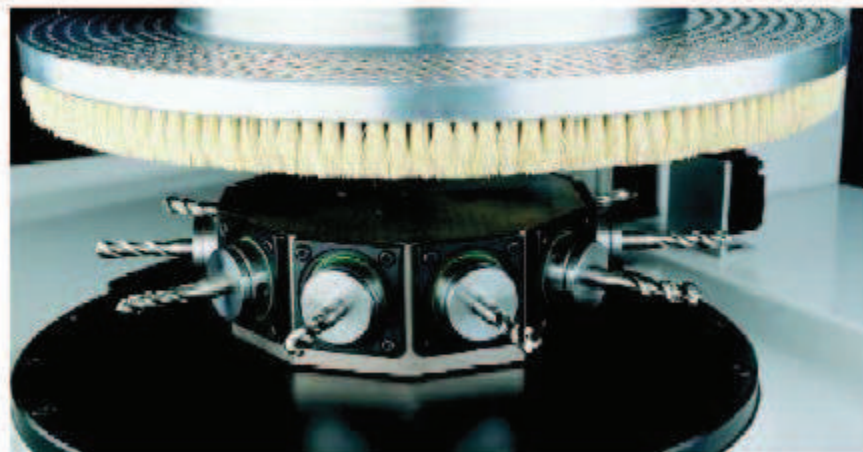
Obr.8 Charakteristika úpravy hrany řezného ostří [22]

2.5.1 Kartáčování [24,20]

Pro kartáčování VBD se používá měkkého kartáčku z přírodních polymerních materiálů či ocelového drátu, které jsou usazeny v leštící podložce. Jako abrazivní smáčedlo se používá granulát nebo pasta na diamantové bázi. Některá literatura uvádí kartáčování jako druh leštění. V případě specifických požadavků na povrch a rádius špičky se volí kartáčování s nylonovými vlákny. Při kartáčování s nylonovými vlákny se odebírá pouze malé množství materiálu a vylepšuje se povrch VBD. Jako abrazivní materiál se při kartáčování pomocí nylonových vláken používá SiC, Al₂O₃ či kubický nitrid bóru nebo polykrystalický diamant.



Obr.9 Kartáčovací stroj pro nástroje GERBER [24]



Obr.10 Pracovní prostor kartáčovacího stroje GERBER pro nástroje [24]

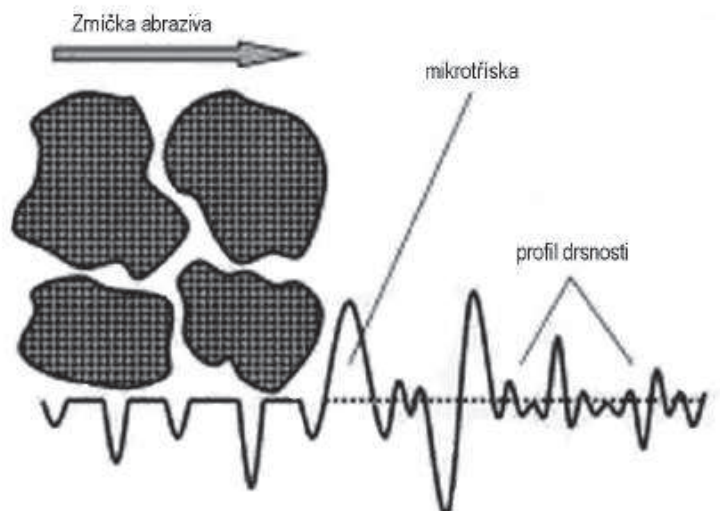


Obr.11 Kartáčování hran VBD [20]

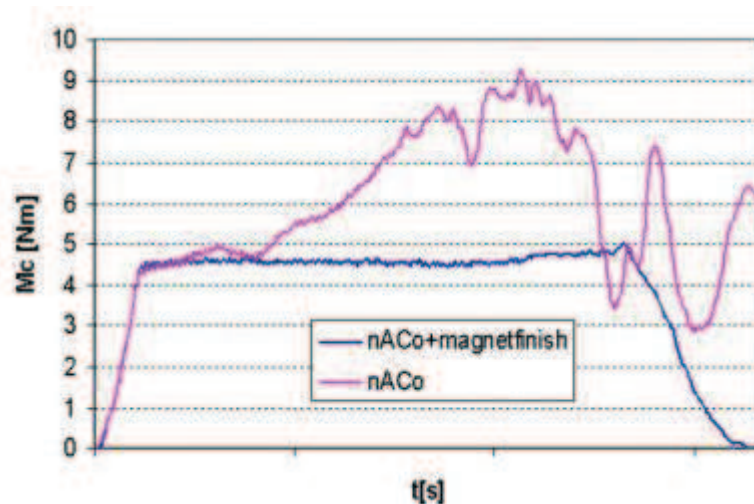
2.5.2 Magnetické leštění [24,20]

V průběhu magnetického leštění je obrobek umístěn v magnetickém poli vytvářeném nástrojem. Mezeru mezi obrobkem nástrojem vyplňuje procesní prášek. Částice procesního prášku obsahují magnetickou a abrazivní složku. Magnetická složka udržuje prášek v mezeře a abrazivo je nástroj. S relativním pohybem po obrobku za použití permanentních magnetů je adheze prášku velmi účinná a vytváří tak stálý tlak na obrobek. Jednou z velkých výhod je tak účinnost procesu. Magnetické leštění lze použít nejen u magnetických materiálů, ale také u cermetů nebo SK a pro materiály s rozdílnými tvrdostmi.

Parametry dosahované při magnetickém leštění lze dosahovat různé $R_a = 0,02 \mu\text{m}$ a $R_z = 0,08 \mu\text{m}$. Vnějšího zaoblení lze dosáhnout od $3 \mu\text{m}$ do $50 \mu\text{m}$. Díky silné redukci povrchové drsnosti je používáno magnetické dokončování pro velkou řadu nástrojů jako jsou například závitníky frézy, vrtáky.



Obr.12 Působení magnetického leštění na strukturu povrchu [25]



Obr.13 Průběh krouticího momentu u neupraveného a magneticky upraveného nástroje [23]

2.5.3 Omílání [23,24]

Omílání (některé literatury uvádí suché omílání nebo vibrační dokončování) je jedním z nejdéle používaných metod mechanického dokončování. Tato metoda je používána již více jak 50 let.

Omílání se používá zejména pro odstranění otřepů a vytvoření rádiusů na ostrých přechodech. Zároveň zbavuje povrchových nečistot, mastnot či koroze. Při této metodě je dosažen dokonalý lesklý povrch. Principem jsou centrifugy, válce či jiné nádoby, které se plní omílacím materiálem a vytváří otáčivý či vibrační moment. Ve vibračním omílacím stroji dochází zároveň k broušení a leštění při vzájemném pohybu obrobků a omílacích tělísek (válečky z porcelánu, hranoly apod.) s hmotou tvořenou speciálními brusnými a lešticími minerálními přísadami.

Nejprve dojde k vyhlazení drsného povrchu, poté se minerálie samy rozmělní a přemění se na lešticí prášek. Odpařené množství vody je nahrazeno minimálním přísunem vody do omílacího stroje. Poté co je povrch dostatečně hladký, minerálie jsou ze stroje odplaveny a proces pokračuje jen s lešticími tělísky.



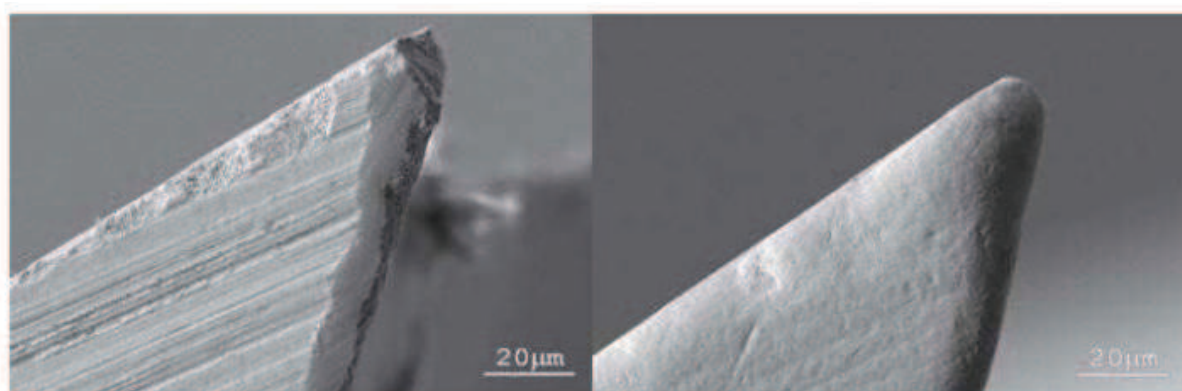
Obr.14 Pohled do zařízení omílání v granulátech [20]

Pomocí omílání lze mimo jiné odstraňovat z povrchu vrstvy rzi, okují či dokonce nežádoucí zabarvení po předchozích tepelných úpravách. Obrobky, omílané za použití kyselých sloučenin je nutné po skončení moření proplachovat čistou vodou tak dlouho, dokud vzory z oplachu reagují neutrálně. Po neutralizaci následuje ochrana proti korozi – pasivace.

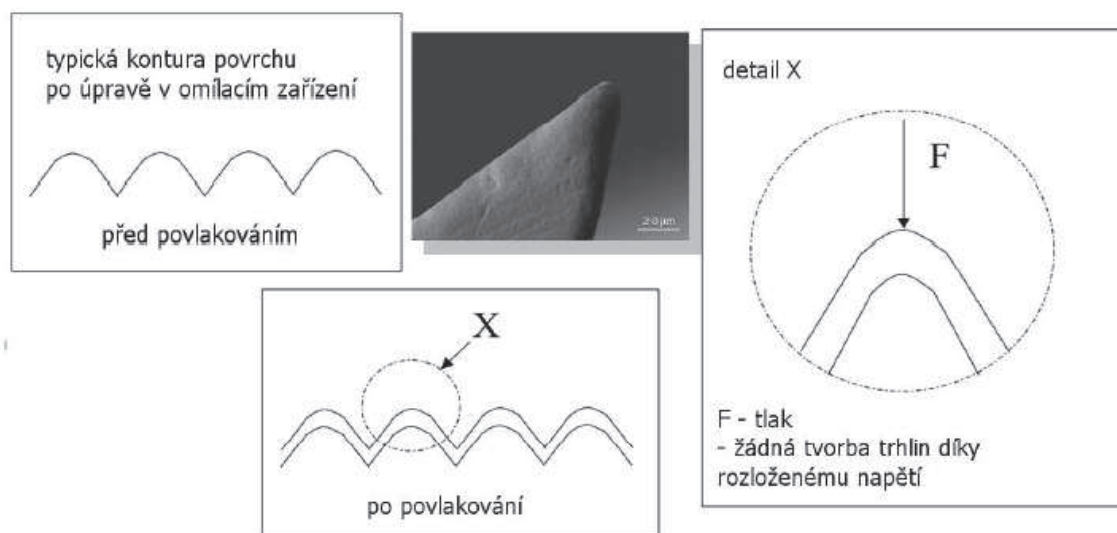
Moderní vibrační omílací stroje jsou opatřeny vibračními elektromotory s trvalým mazáním. Odstředivé omílací stroje umožňují odjehlování, zaoblování hran u dílců a velmi jemné vyhlazování povrchu u destiček. K omílání řadíme i další strojní zařízení například sušičky nebo zařízení pro úpravu a recyklaci procesní kapaliny znečištěné omíláním. Správný výsledek omílacího procesu ovlivňuje spolupůsobení strojního zařízení, omílacích činidel a omílacích tělísek. Omílací činidla mají za úkol udržovat omílací tělíska čistá a schopná abraze. Omílací tělíska jsou vyráběna v několika velikostech a geometrických tvarech. Některé typy omílacích tělísek jsou uvedeny v tabulce 13.

Hlavní používané typy omílacích tělísek	
Typ tělíska	Popis
keramická omílací tělíska	vyznačují větší intenzitou omílání a schopností vytvářet světlé a lesklé povrchy
plastová omílací tělíska	jsou naproti tomu vhodná pro omílání zejména měkkých materiálů. Jejich velkou výhodou je, že se na rozdíl od keramických tělísek neodštěpují
zrna spékané keramiky	se používají především jako mikrofinišovací prostředek. Jsou výborným prostředkem pro členité povrchy a dobře odolávají opotřebení
ocelová (korozivzdorná) tělíska	se používají hlavně ve formě jehliček a kuliček
jemné médium	jsou používány skořápky vlašských ořechů napuštěné diamantovou pastou, · suché diamantové prášky

Tab.13: Hlavní používané typy omílacích tělísek [24]



Obr.15 Břit před a po omílání [26]



Obr.16 Kontura povrchu po úpravě řezné hrany omíláním [21]

2.5.4 Mikro-otryskávání proudem abraziva - MOPA [20, 25, 23, 24, 17]

Mikro-otryskávání je jedna z úprav řezné hrany spadající do okruhu mechanických úprav nástrojů. Mikro-otryskávání proudem abraziva odstraňuje materiál pomocí mechanického účinku proudu brusiva, který dopadá na nástroj. Úprava řezné hrany ostří probíhá za pomoci proudu brusiva tvořeného brusnými částicemi o průměru 10 až 50 mikrometrů. Proud brusiva je poháněn netečným plynem přes malou trysku (o průměru 0,4 až 1,2 mm) při vyšších tlacích než 6 barů. Proud brusných částic tak putuje rychlostí přibližně 150 až 300 m/s na obrobek.

Mikro-otryskávání se dělí na suché tryskání a na mokré tryskání. V tabulce 14 a tabulce 15 jsou pro porovnání uvedeny jejich hlavní výhody. Suché tryskání je proces, kde se používá suchého stlačeného vzduchu k pohánění abrazivního média na určený povrch. Někdy je tryskání uváděno také pod pojmem pískování, abrazivní tryskání, apod.

Hlavní výhody suchého tryskání
- Rychlost procesu
- Levný proces
- Účinný proces čištění
- Ekologický proces (možnost recyklace abraziva)
- Nepoužívá nebezpečné látky
- Vytvoří špičkové podmínky pro nanášení povlaků

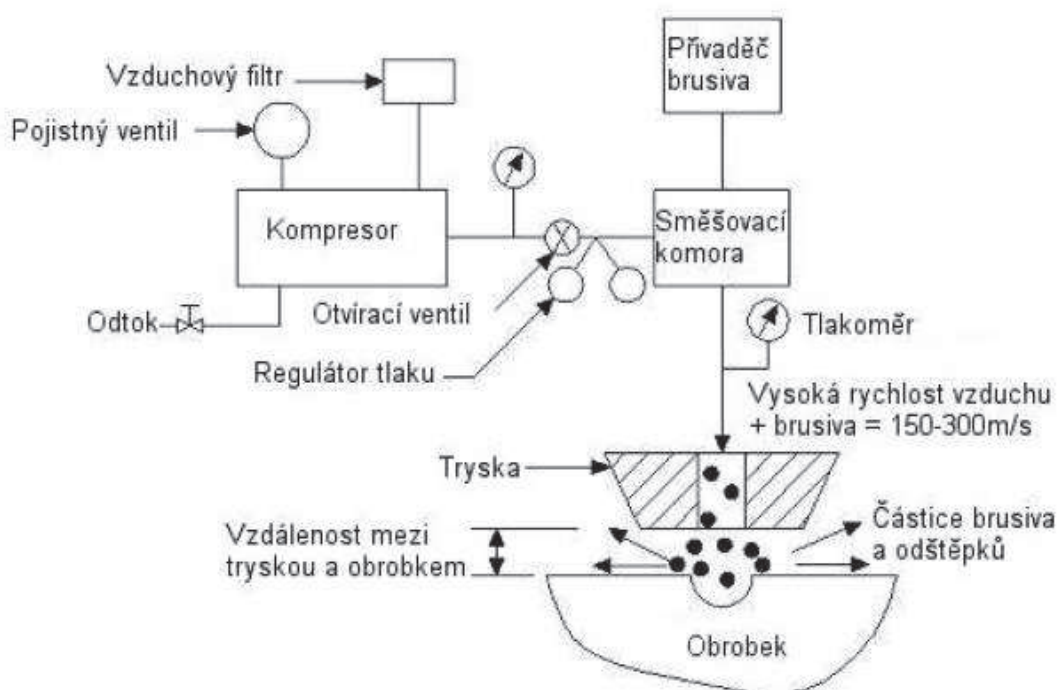
Tab.14: Hlavní výhody suchého tryskání [24]

Při mokřém tryskání je využíváno tří složek (materiál pro tryskání, roztok - vodu a stlačený vzduch). Stlačený vzduch je zde pro vyvolání efektu čištění (promývání povrchu či jeho odjehlování). Promýváním navíc zabraňujeme uvíznutí částic nebo jejich kontaminaci během procesu a díky tomu dosahujeme dokonale čistých ploch. Hlavní částí zařízení pro mokřé tryskání je pumpa na volbu potřebné rychlosti tryskání a tvorbu tryskacího roztoku.

Hlavní výhody mokrého tryskání	
-	Použití jemných částic
-	Zmírnění kontaminace povrchu procesním abrazivem
-	Redukce prachových částic
-	Možnost recyklace
-	Redukce nerovností
-	Eliminace tepelné deformace malých dílů jako jsou VBD
-	Zachování rozměrových tolerancí
-	Výborný vzhled povrchu
-	Výborný stav povrchu po povlakování

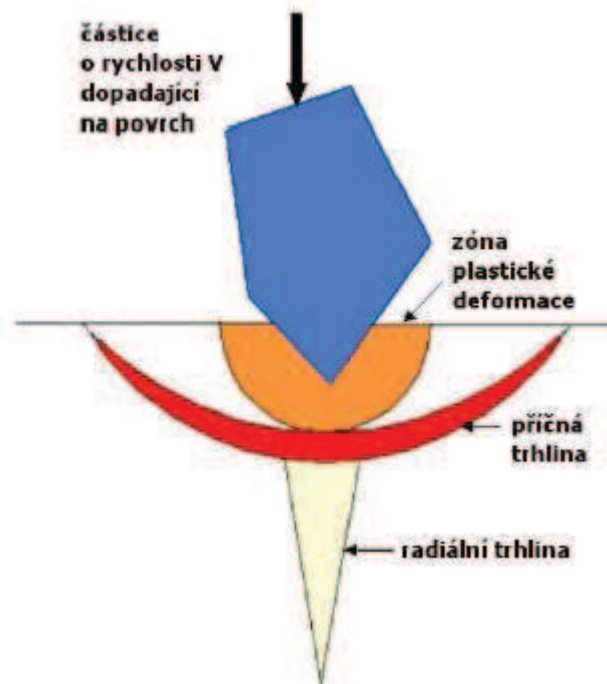
Tab.15: Hlavní výhody mokrého tryskání [24]

Společnou výhodou obou typů tryskání je použití na plochách, kde hrozí, že při broušení došlo k vyloučení kobaltu. Na takových plochách je tryskání povrchu před povlakováním nutností. Tryskání broušených ploch zlepšuje přilnavost povlaků a řezné výkony. Dále zvyšuje odolnost vůči opotřebení a snižuje povrchová či podpovrchová napětí. Je několik prostředků pro tryskání např.: minerální písky, plasty, ocelolitinové částice, diamantové suspenze, oxidy hliníku, sklo, sloučeniny zirkonu a jiné. Zajímavostí je použití slupek vlašských ořechů užívaných právě pro nástroje.



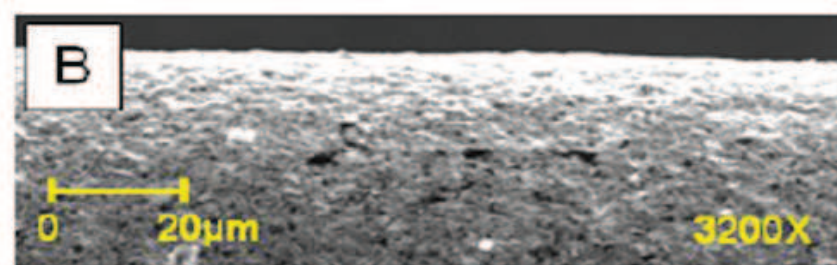
Obr.17 Systém pro mikro-otryskávání proudem abraziva [20]

Výsledkem je odstraněný materiál ve formě vylamování třísky. Nejběžněji užívaná brusiva při mikro-otryskávání proudem abraziva jsou korund a karbid křemíku. Trysky se vyrábí z karbidu wolframu či safíru. Rychlost odstraňování při mikro-otryskávání proudem abraziva ovlivňuje typ a velikost brusiva, rychlost toku brusiva, vzdálenost mezi tryskou a obrobkem a tlak plynu.

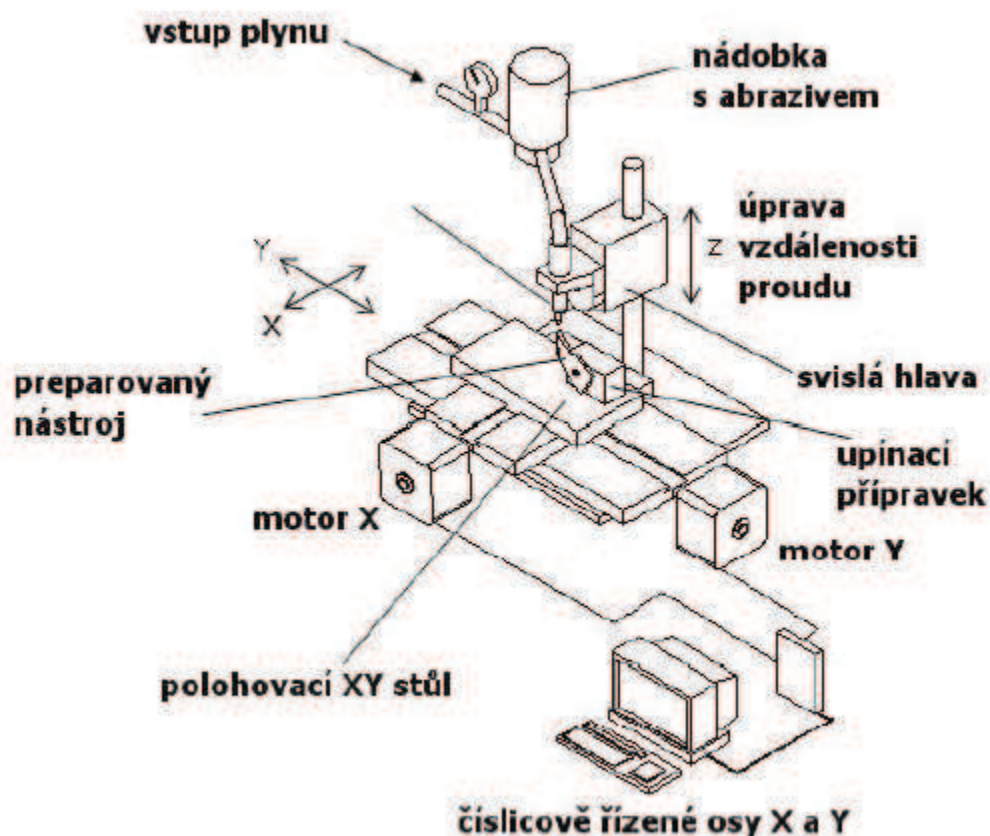


Obr.18 Šíření trhliny při procesu MOPA [20]

Pro odstranění přebytečného houževnatého a křehkého materiálu jsou navrženy odlišné mechanismy. Při odstranění houževnatých materiálů je materiál odstraněn plastickou deformací+pracovním opotřebením či plastickým namáháním+deformačním opotřebením. V případě odstranění křehkých materiálů se provádí odstranění materiálu kvůli rozrušení povrchu, kritickému plastickému namáhání, pružné plastické deformaci, radiálnímu tvoření trhlin a šíření energie povrchem. Odstranění materiálu pro mikro-otryskávání proudem abraziva je tak prováděno podle rozdílných analytických modelů.



Obr.19 Povrch VBD po mikro-otryskávání proudem abraziva [25]



Obr.20 MOPA uspořádání vybavení [20]

Technologie mikro-otryskávání proudem abraziva musí respektovat charakter nástroje, jeho funkční břity a plochy. Proto je volba parametrů této metody a řešení automatizace procesu záležitostí do značné míry empirickou. Tento proces úpravy je závislý v převážné většině na zkušenosti obsluhy.

Na obrázku 20 je znázorněno strojní vybavení na úpravu mikrogemetrie ostří rezného nástroje. Rezný nástroj připravený pro úpravu mikrogemetrie ostří je upevněn k polohovacímu stolu. Stůl je řízen číslicově s pohybem ve směrech X, Y. Tryska je upevněna na vertikální hlavu, umožňující úpravu vertikální vzdálenosti mezi tryskou a ostřím určeným pro úpravu. Brusivo je uloženo v nádobě s ventilem, který umožňuje dopravu brusiva zvýšeným tlakem vzduchu.

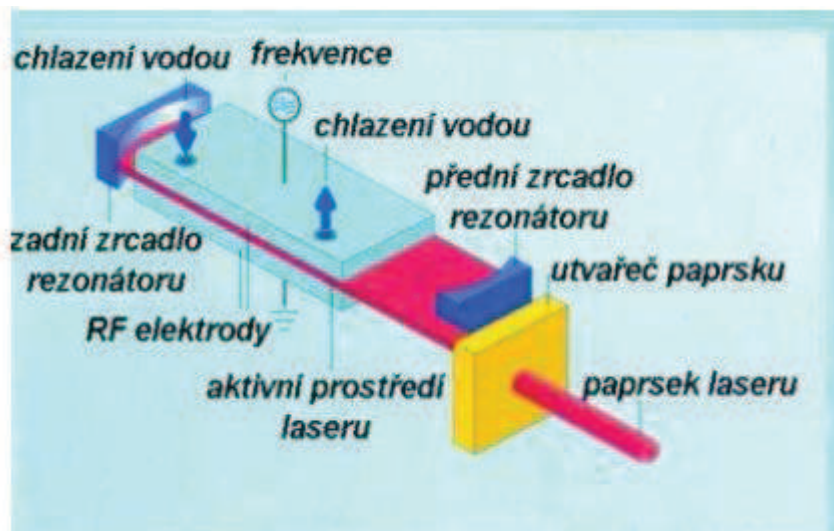
2.5.5 Úprava laserovým paprskem [27,20]

Úprava VBD laserovým paprskem je bezkontaktní typ obráběcího procesu, který může být použit pro celou řadu materiálů. Princip je v zaostřování laserového paprsku a následném tavení a vypařování přídavku materiálu z obrobku. Díky tomu je vytvořen geometricky komplexní profilu řezu a obrobek je zbaven nečistot. Nedochozí k nataveninám materiálu a ořepům. Velikost a tvar zaoblení hrany je ovlivněn polohou a výkonem laseru.

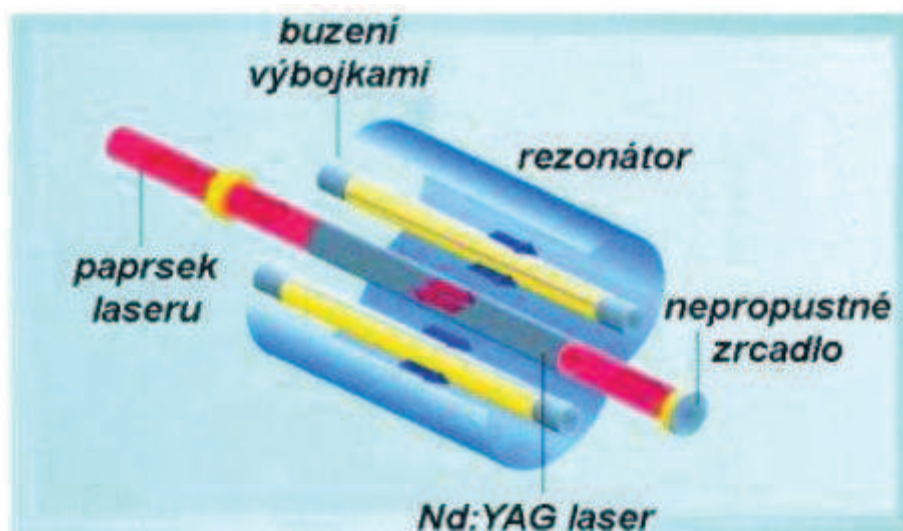
Díky požadavkům na vyšší přesnost za rozumnou cenu poukázal v posledních letech výzkum na řadu způsobů jak zlepšit výkon procesu obrábění laserem. Výkon procesu může být značně zlepšen správným výběrem parametrů laseru.

Při úpravě laserem se používá plynový laser CO_2 a pevnolátkový YAG laser. CO_2 laser má

vysoký výkon paprsku vzhledem k vlnové délce $10\ \mu\text{m}$ v infračervené oblasti. Při úpravě laserem dochází nejdříve k tavení materiálů, poté k jeho vypařování a následně k chemické degradaci (díky porušení chemických vazeb). Poté, co je laserový paprsek o vysoké energii zaostřen na povrch obrobku, vzniká tepelná energie. Tepelná energie následně ohřeje a roztaví požadovaný obráběný materiál. Ten je pak odstraněn proudem plynu o vysokém tlaku.



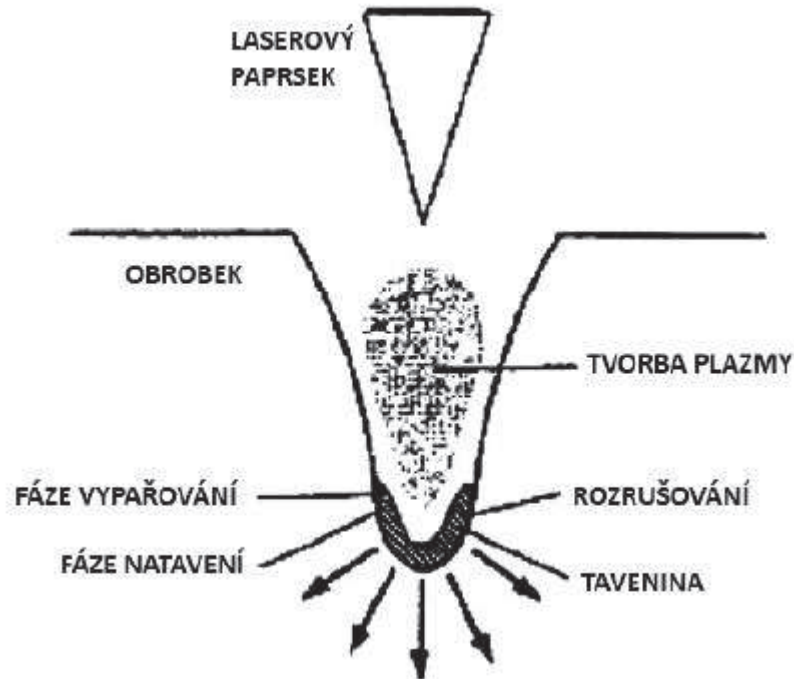
Obr.21 Schéma laseru CO₂ [27]



Obr.22 Schéma laseru YAG [27]

Čištění povrchu materiálu laserem je jednou z vhodných náhrad čištění za pomoci rozpouštědel či mechanických metod (např.: kartáčování, tryskání).

Na rozdíl od mechanických úprav nedochází k poškození povrchu čištěného materiálu. Jednou z výhod úpravy povrchu laserem je zabránění nepříznivého působení na životní prostředí (nevznikají odpady, nejsou nutné další chemikálie). Velkou nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady na zařízení pro úpravu laserem.



Obr.23 Schéma průběhu odebrání materiálu laserem CO₂ [20]

3 Návrh a charakteristika experimentu

Experiment probíhal v laboratořích Katedry technologie obrábění Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni. V následující kapitole je popsáno experimentální a měřící vybavení použité při experimentální části diplomové práce. V závěru kapitoly jsou popsány experimentální záběrové podmínky.

3.1 Experimentální vybavení

3.1.1 Stroj



Obr.24 Vertikální obráběcí centrum MCV 750 A

Základní technické údaje Vertikální obráběcí centrum MCV 750 A	
Počet CNC řízených os:	3
Jmenovitý výkon vřetena:	16 kW
Rozsah otáček vřetena:	20 - 13000 ot/min
Zdvih v ose X, Y, Z:	750, 500, 500 mm
Rozměry upínacího stolu:	1000 x 500 mm
Pracovní posuvy X, Y, Z:	1-15000 mm/min
Rychloposuvy X, Y, Z:	25 m/min
Řídicí systém:	Heidenhein TNC 426

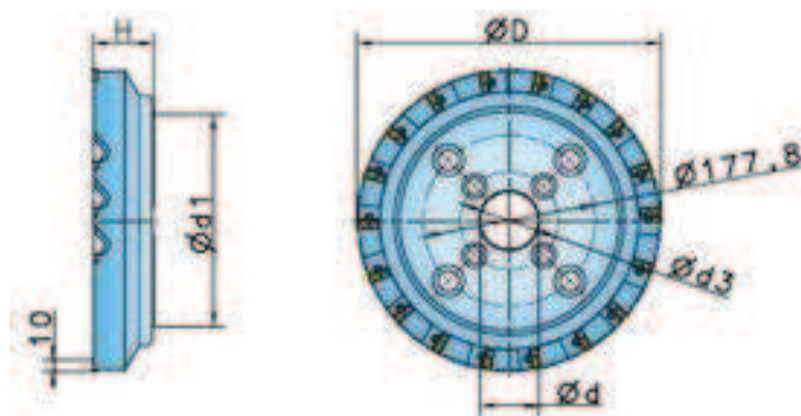
Tab.16: Základní technické údaje Vertikální obráběcí centrum MCV 750 A

3.1.2 Nástroj

3.1.2.1 Frézovací hlava



Obr.25 Frézovací hlava Ingersoll 6F2B080R00 [10]



Obr.26 Rozměry frézovací hlavy Ingersoll 6F2B080R00 [28]

Ingersoll 6F2B080R00						
D [mm]	d [mm]	H [mm]	d1 [mm]	d3 [mm]	z [ks]	m[kg]
80	27	50	70	-	4	1.5

Tab.17: Rozměry frézovací hlavy Ingersoll 6F2B080R00

3.1.2.2 Vyměnitelná břitová destička

Pro experiment byly zvoleny vyměnitelné břitové destičky od firmy Ingersoll s označením YDA323L104 a řezný materiálem IN04S. Jedná se o destičky určené pro obrábění hliníku a pro lehké a středně těžké obrábění šedé litiny. Zařazením je IN04S submikronový slinutý karbid. Volbou této destičky navazujeme na experimenty z předchozích let, kde se pro frézování oceli P91 nejlépe hodil karbid IN2004, což je totožný s IN04s, akorát deponovaný vrstvou TiAlN.

Testované úpravy řezných hran destiček:

- Hrana přebroušená bez jakékoli úpravy
- Řezná hrana upravená omíláním
- Řezná hrana upravená laserovým paprskem
- Řezná hrana upravená mokrým otryskáváním
- Řezná hrana upravená suchým otryskáváním



Obr.27 Vyměnitelná břitová destička Ingersoll YDA323L104 [28]

3.2 Měřicí vybavení

3.2.1 Drsnoměr Mahr MarSurf M300

Základní technické údaje drsnoměr Mahr MarSurf M300	
Měřicí rozsah:	do 350 μm
Jednotky:	$\mu\text{m}/\mu\text{inch}$ volitelně
Normy:	ISO/ASME/JIS a MOTIF volitelně
Délka měřicí dráhy dle DIN EN ISO 4288/ ASME B46.1:	1.75 mm, 5.6 mm, 17.5 mm (0.07 in, 0.22 in, 0.7 in) i dle EN ISO 12085: 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 12 mm, 16 mm
Počet měřících drah:	volitelně 1 až 5
Automatická volba filtru a měřené dráhy	
Vyhodnocované parametry DIN/ISO:	Ra, Rq, Rz, Rmax, Rp, Rpk, Rk, Rvk, Rv, Mr1, Mr2, A1, A2, Vo, Rt, R3z, R _{Pc} , R _{mr} , R _{Sm} , R _{sk} ; JIS: Ra, Rz, RzJIS, Sm, S, tp; ASME: Rp, Rpm; MOTIF: R, Ar, Rx, W, CR, CL, CF
Znázornění překročení tolerance na displeji včetně záznamu měření	
Automatické nebo manuální nastavení stupnice	
Tisk R-profilu (ISO/ASME/JIS), P-profilu (MOTIF), a záznamu měření	
Datový výstup s nebo bez časových údajů	
Integrovaná paměť pro 40,000 naměřených hodnot a 30 profilů	
Dynamické funkce pro kalibraci	
Možnost uzamčení nastavení přístroje s možností použití hesla	

Tab.18: Základní technické údaje drsnoměr Mahr MarSurf M300



Obr.28 Drsnoměr Mahr MarSurf M300

3.2.2 Mikroskop Blicke MULTICHECK PC 500

Základní technické údaje mikroskop Blicke MULTICHECK PC 500	
Použití pro měření rotačních i nerotačních nástrojů.	
horizontální provedení	
rozsah osy x a y:	0 - 150 mm
možnost natáčení nástroje vůči objektivu:	0° - 90°
4 objektivy se zvětšením 10x, 30x, 75x a 150x	
přípravek pro upínání rotačních nástrojů	
přípravek pro měření rotačních i nerotačních nástrojů	
prizmatický přípravek pro měření VBD	

Tab.19: Základní technické údaje mikroskop Blicke MULTICHECK PC 500



Obr.29 Mikroskop Blicke MULTICHECK PC 500

3.2.3 Dynamometr Kistler s příslušenstvím

Při měření byl použitý piezoelektrický tříosložkový dynamometr Kistler 9255a, snímající tři navzájem kolmé složky řezné síly.



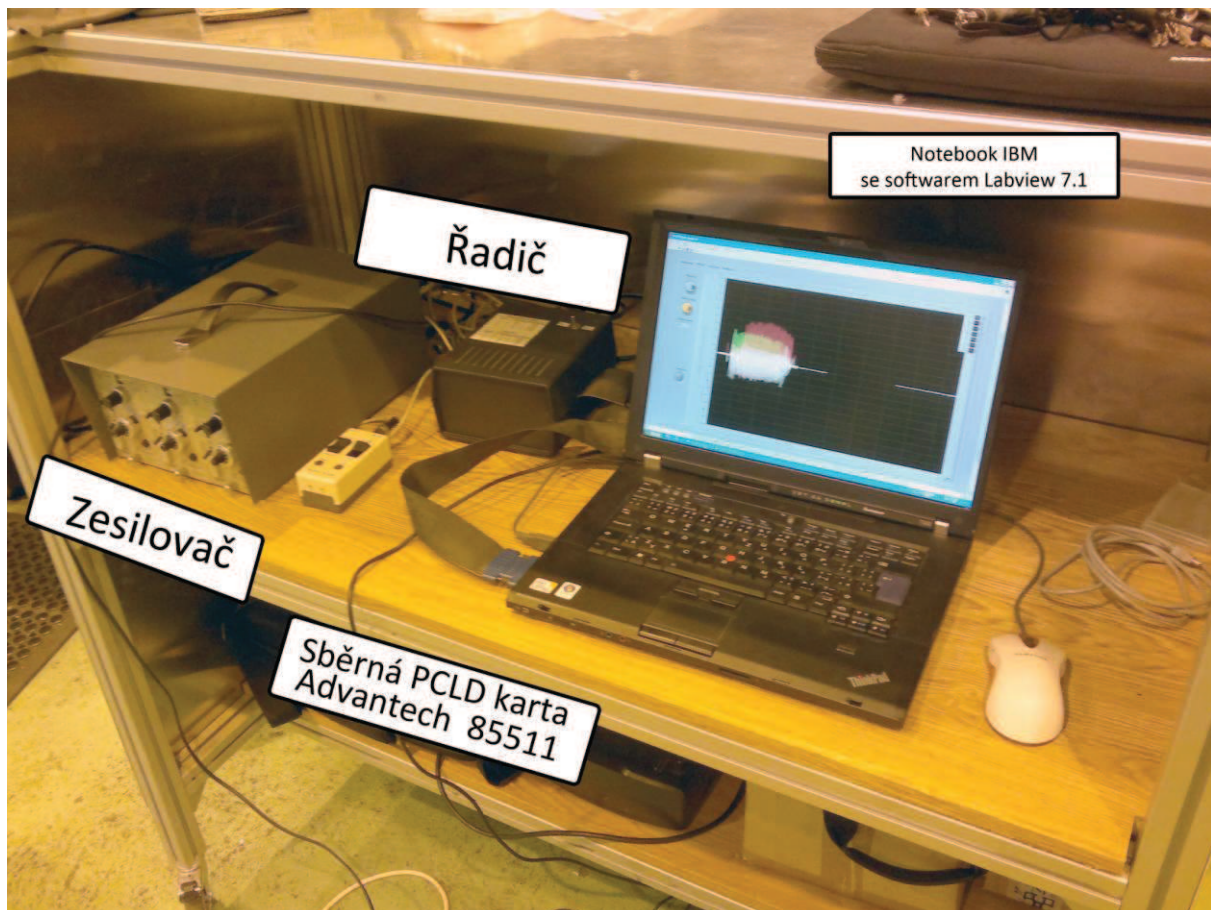
Obr.30 Tříosložkový dynamometr Kistler 9255a [29]

Základní technické údaje tříosložkový dynamometr Kistler 9255a	
měřicí rozsah ve směru X [kN] :	-20 až +20
měřicí rozsah ve směru Y [kN] :	-20 až +20
měřicí rozsah ve směru Z [kN] :	10 až 40
dovolená provozní teplota [°C]:	0 až 70
vlastní frekvence [kHz]:	3
chyba měření [%]:	1
citlivost [pC/N]:	8
spojovací kabel se zesilovačem:	1687A5

Tab.20: Základní technické údaje tříosložkový dynamometr Kistler 9255a

Použité příslušenství k tříosložkovému dynamometru Kistler 9255a
Zesilovač Kistler 5007
Řadič
Sběrná karta 85511 typu PCLD od firmy Advantech
Software Labview 7.1
Notebook IBM

Tab.21: Použité příslušenství k tříosložkovému dynamometru Kistler 9255a [19]

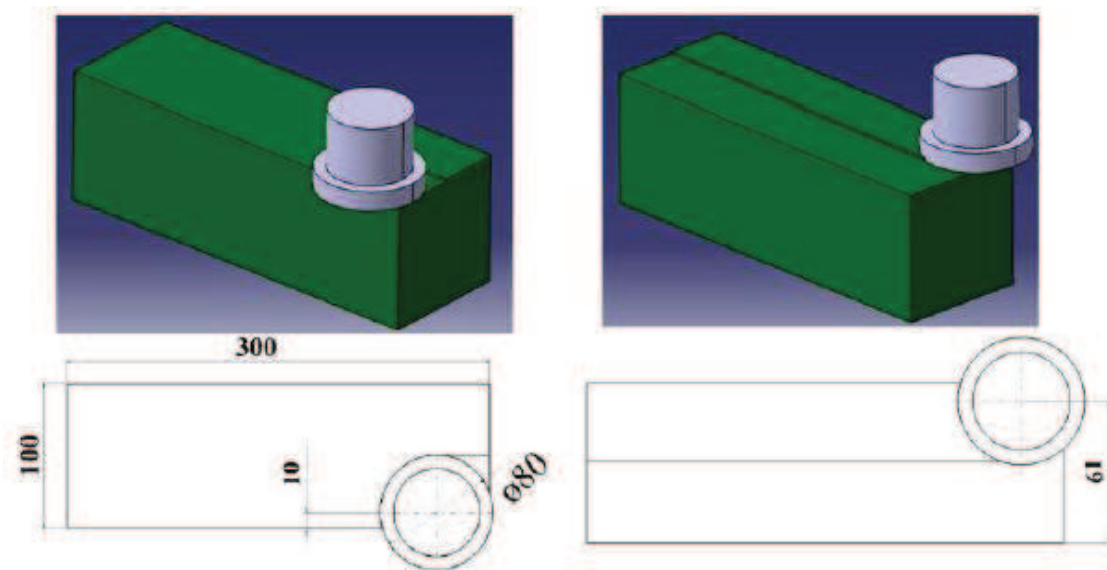


Obr.31 Příslušenství pro třísložkový dynamometr Kistler 9255a použité při experimentu [13]

3.3 Experimentální záběrové podmínky a pravidla pro měření sledovaných veličin

3.3.1 Experimentální záběrové podmínky

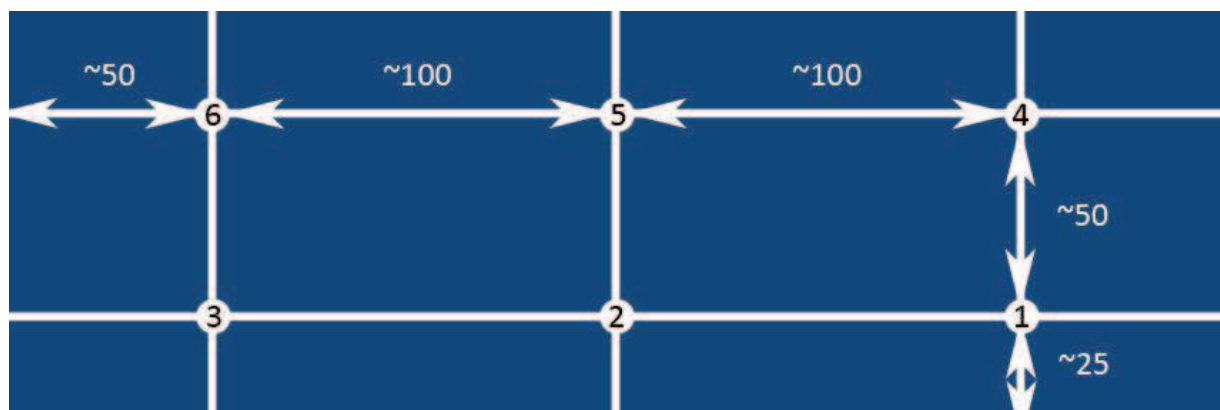
Na obrázku 32 je znázorněno schéma experimentálních záběrových podmínek. Délka polotovaru z pohledu nárysu byla 300 mm a jeho šířka 100 mm. Experimentální záběrové podmínky byly jak pro preexperiment, tak pro experiment totožné.



Obr.32 Schéma experimentálních záběrových podmínek [10]

3.3.2 Pravidla pro měření sledovaných veličin

Obrázek 33 znázorňuje obrobek z pohledu nárysu a na něm rozložení náměrových oblastí pro měření parametrů obrobeného povrchu. Oblasti náměru jsou zvoleny s určitou pravidelností tak, aby byla získány data rovnoměrně po celém povrchu. Při každém přejezdu nástroje byly zvoleny tři náměrové body.



Obr.33 Rozmístění oblastí náměrů na obrobku

Současně s parametry charakterizující obrobený povrch bylo měřeno opotřebení nástroje. Při měření těchto parametrů je nutné přerušení řezného procesu. Měření parametrů charakterizující obrobený povrch a opotřebení nástroje bylo prováděno v intervalech o objemu odebraného materiálu 6 cm^3 , 30 cm^3 a 60 cm^3 . Což odpovídá hladinám 10, 50 a 100. Jedna hladina pak odpovídá jedné hloubce řezu. V tabulce 22 jsou vypsána určená kritéria pro pre-experiment a experiment. Experimentální kritéria byly zvoleny dle požadavků na praktickou aplikaci.

KRITÉRIA PRO PRE-EXPERIMENT A EXPERIMENT	
Název	Kritérium
trvanlivost nástroje	$VB_{krit}, KB_{krit} = 0,150 \text{ mm}$
dosažení drsnosti Ra	$Ra \leq 0,8 \mu\text{m}$
dosažení objemu odebraného materiálu	$V = 60\text{cm}^3$

Tab.22 : Experimentální kritéria pro pre-experiment a experiment

4 Analýza získaných výsledků

Analýza získaných výsledků proběhla dle statistického vyhodnocení. Experiment probíhal pro fázi dokončování. Proces dokončování je většinou poslední fází procesu obrábění, díky tomu je kladen vysoký požadavek na jakost povrchu. Experimentální část diplomové práce tak zkoumá nejen trvanlivost nástroje, řezné podmínky, ale také jakost povrchu.

Vzhledem k tomu, že se jedná o diplomovou práci vytvořenou v projektu SGS-2012-023 Efektivní frézování těžkoobrobitelných feriticko-martenzitických ocelí, experimentální část se skládá z několika fází. V první fázi, v pre-experimentu, došlo k volbě nejvhodnější řezné rychlosti s ohledem na hospodárný výsledek obrábění. Po volbě řezné rychlosti následovala část volby nejvhodnějšího poloměru zaoblení ostří břitu. Tato část je zpracována v předcházející diplomové práci v rámci tohoto projektu (Jan Petele: Efektivní frézování feriticko-martenzitických ocelí - vliv mikrogeometrie nástroje na řezný proces [33]). Po zvolení vhodného poloměru zaoblení ostří byla experimentem nalezena vhodná úprava řezné hrany břitové destičky. Volba vhodné úpravy řezné hrany břitové destičky je hlavním cílem této diplomové práce. V závěru experimentu byly společně s dodavatelem VBD vytipovány destičky konkurence pro porovnání a následně byly tyto VBD otestovány a porovnány.

4.1 Statistické vyhodnocení výsledků [30,31]

Každé měření je zatíženo chybou. Nejzávažnější jsou tzv. hrubé chyby měření. Ty mohou být způsobeny chybou pozorovatele, nepřesností měřícího zařízení, vlivem okolí a mnoha dalšími faktory. S takovými chybami nelze v měření počítat a je nutné jejich odstranění.

K odstranění hrubých chyb byl použit statistický test na přítomnost hrubé chyby. V práci bylo použito tzv. Grubsovo testovací kritérium. To slouží k odhalení hrubé chyby a její vynechání ze souboru naměřených hodnot. Grubsovo testovací kritérium je dáno vztahem:

$$T_k = \frac{|y_{i \max} - \bar{y}|}{s_i} \quad \text{nebo} \quad T_k = \frac{|y_{i \min} - \bar{y}|}{s_i}$$

kde

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{m-1} \cdot \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}$$

Pokud jsou hodnoty T_k menší než tabulková hodnota T_p odečtená ze statistických tabulek (viz příloha 1) lze říci, že výsledky s určitou pravděpodobnostní hladinou neobsahují hrubou chybu. Pokud je jedna z hodnot T_k vyšší postupuje se v postupném umazání maximální či minimální hodnoty (dle toho jaké T_k překračuje) až do hodnoty T_k menší než tabulková hodnota T_p . V diplomové práci bylo počítáno s 95% hladinou pravděpodobnosti.

4.2 Pre-experiment

Z předchozích experimentů, prováděných na Katedře technologie obrábění Západočeské univerzity vyšly nejlépe řezné destičky firmy Ingersoll typu YDA323L104 s řezným materiálem IN2004. Pro experiment byly zvoleny vyměnitelné břitové destičky YDA323L104 s řezným materiálem IN04S. IN04S je totožný karbid s IN2004, akorát není deponovaný žádnou vrstvou (IN2004 je deponovaný TiAlN). Frézovací hlava byla dle použitého typu vyměnitelných břitových destiček a předchozích experimentů projektu SGS-2012-023 zvolena Ingersoll 6F2B080R00 o průměru 80 mm.

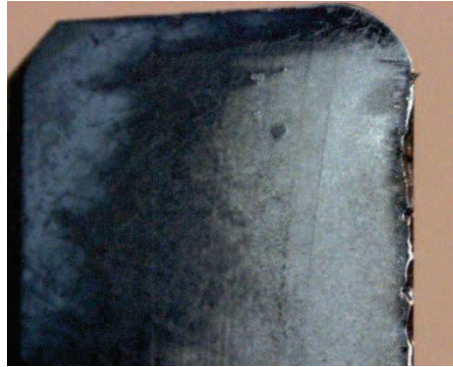
EXPERIMENTÁLNÍ PODMÍNKY PRE-EXPERIMENTU	
řezný materiál:	submikronový slinutý karbid IN04S
v_c [m.min ⁻¹]:	140, 160, 180, 200 a 230
v_f [mm.min ⁻¹]:	2500, 2880, 3250, 3600 a 4118
n [min ⁻¹]:	600, 640, 720, 800 a 915
f_z [mm]:	4,5
a_p [mm]:	0,02
chlazení:	záplavové, bez chlazení
počet VBD:	1
sousedné frézování	

Tab.23 : Experimentální podmínky pre-experimentu

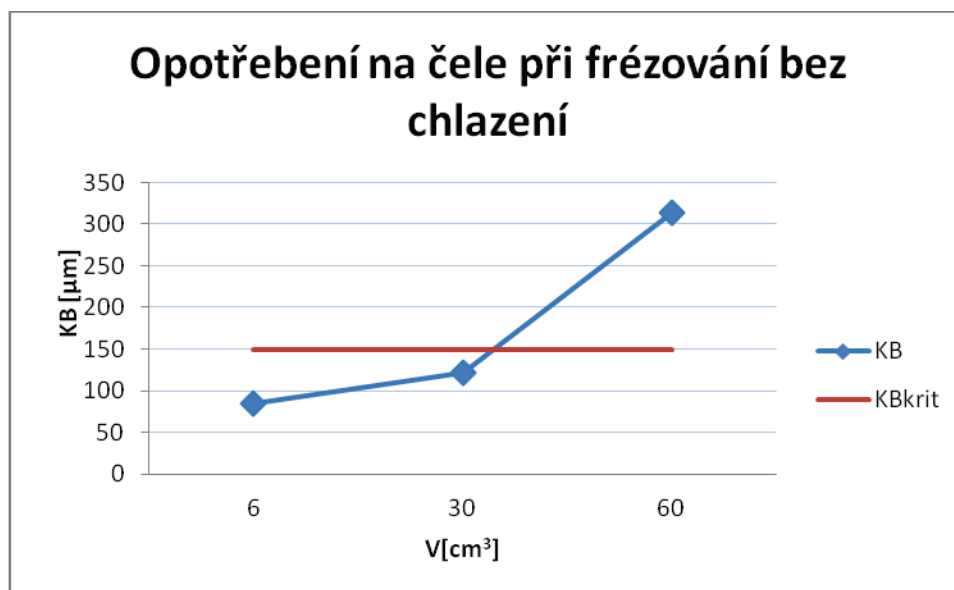
V tabulce 23 jsou uvedeny experimentální podmínky pre-experimentu. Jako konstantní byly zvoleny parametry posuvu na zub $f_z = 4,5$ mm a hloubky řezu $a_p = 0,02$ mm. Důvodem použití těchto konstantních parametrů je jejich použití při reálném obrábění v praxi. Z důvodu odstranění vlivu nepřesností rozměru nástroje či VBD byl nástroj osazen pouze 1 VBD.

Pokud má být výsledkem experimentu zproduktivnění současného stavu obrábění, měl by se experiment odrazit od používaných řezných podmínek. Z důvodu požadavku odvodu třísky z místa řezu bylo zvoleno záplavové chlazení. Frézovací hlava byla osazena pouze jednou VBD. Jednu VBD jsme zvolili s ohledem na použití jedné destičky při reálném procesu obrábění. Důvodem použití pouze jedné VBD je omezení vlivu velikosti výrobní nepřesnosti VBD a nástroje na výslednou jakost obrobeného povrchu.

Během pre-experimentu bylo použito záplavové chlazení kapalinou o koncentraci 5,5 %. Při řezné rychlosti $v_c=200$ m.min⁻¹ bylo otestováno frézování bez chlazení. S ohledem na kvalitu povrchu a trvanlivost nástroje se frézování bez chlazení neosvědčilo. Docházelo k opotřebení břitu zejména na čele řezného nástroje, kde došlo k výraznému překročení kritériální hodnoty $KB_{max}=0,150$ mm viz obrázek 34. Lze tedy říci, že obrábění oceli P91 bez chlazení není vhodné.



Obr.34 Opotřebení-břitu řezného nástroje na čele po obrábění bez chlazení



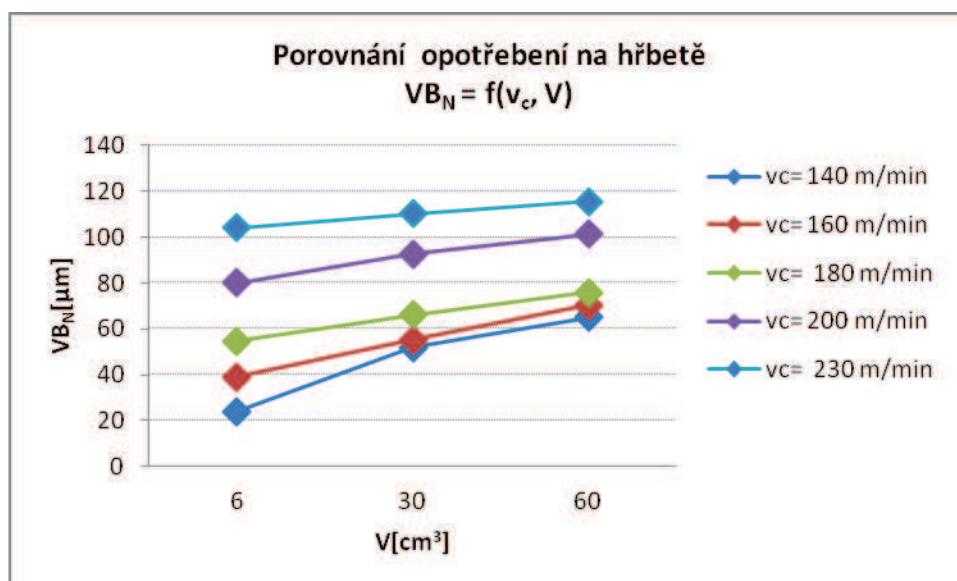
Obr.35 Závislost opotřebení na čele řezného nástroje k objemu odebraného materiálu po frézování bez chlazení

Pro pre-experiment a experiment byly určeny tři experimentální kritéria. První kritérium byla trvanlivost nástroje, kde byla stanovena kritériální hodnota $V_{B_{krit}}$, $KB_{krit} = 0,150$ mm. Další z kritérií bylo dosažení drsnosti $Ra \leq 0,8$ μm . Třetí z kritérií bylo dosažení objemu odebraného materiálu $V=60\text{cm}^3$.

4.2.1 Trvanlivost řezného nástroje

Jedním z hlavních kritérií pro volbu nástroje bývá trvanlivost. Trvanlivost je přímo úměrná opotřebení nástroje. Trvanlivost je možno ovlivnit vhodnou volbou řezných podmínek.

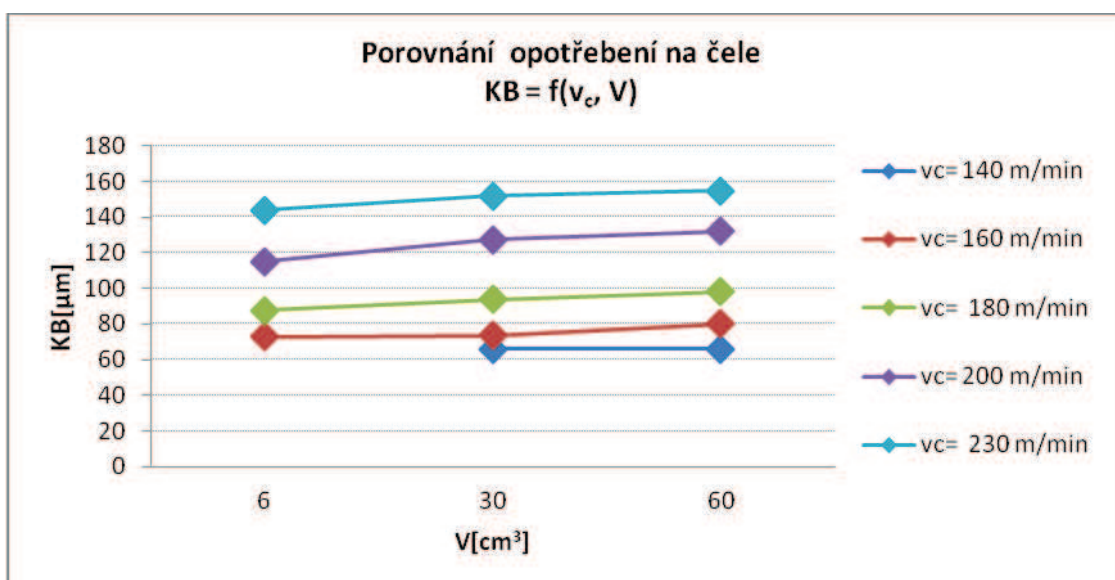
Obrázek 36 znázorňuje porovnání rovnoměrného opotřebení na hřbetě v závislosti na objemu odebraného materiálu a řezné rychlosti. Potvrzuje se již předem známá skutečnost, že opotřebení se při zvyšujícím se množstvím objemu odebraného materiálu zvyšuje. Nejmenší opotřebení na hlavním hřbetě řezného nástroje bylo při $v_c = 230$ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, naopak největší opotřebení na hlavním hřbetě řezného nástroje byl pozorován u řezné rychlosti $v_c = 140$ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$.



Obr.36 Závislost opotřebení na hřbetě k objemu odebraného materiálu při experimentálních podmínkách pre-experimentu

Na obrázku 37 je znázorněna závislost opotřebení na čele k objemu odebraného materiálu při zvolených řezných rychlostech pre-experimentu. Při porovnání s grafem na obrázku 36 je patrná větší míra opotřebení na čele než na hřbetu nástroje. Tato skutečnost je způsobena hladicí geometrií vyměnitelné břitové destičky, kde je větší nápor na čele nástroje než na jeho hřbetu.

Ve všech případech se břit opotřebovával rovnoměrně. Při řezné rychlosti $v_c = 230 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ byla překročena kritériální hodnota opotřebení $KB_{\text{krit}} = 0,150 \text{ mm}$, což bylo jedním z počátečních kritérií. Za nejvhodnější řeznou rychlost lze tak považovat $v_c = 200 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.

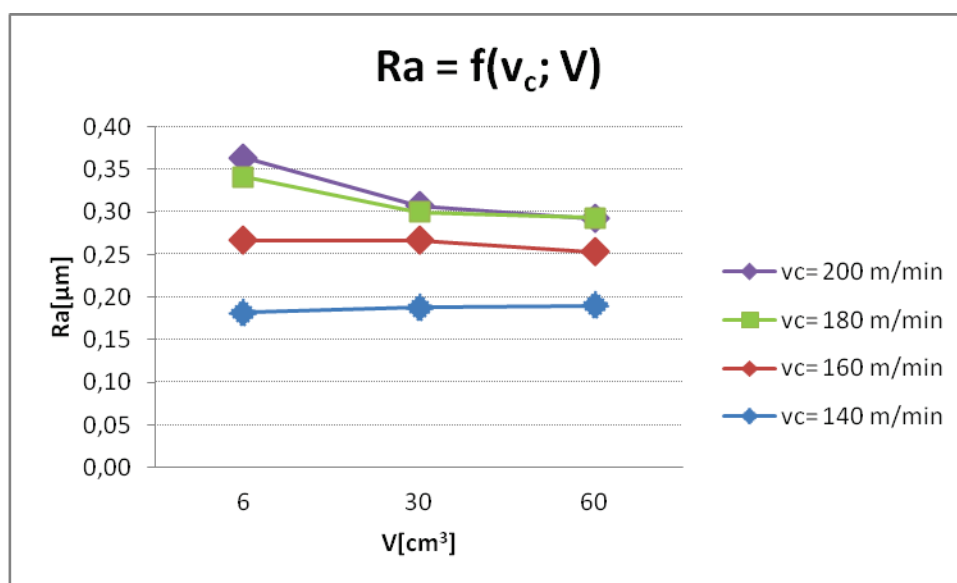


Obr.37 Závislost opotřebení na čele k objemu odebraného materiálu při experimentálních podmínkách pre-experimentu

4.2.2 Drsnost

Na obrázku 38 jsou zobrazeny průběhy drsností obrobeneho povrchu vyjádřené pomocí parametru Ra v závislosti na objemu odebraného materiálu pro jednotlivé řezné rychlosti. Ani v jednom případě nedošlo k překročení kritéria Ra= 0,8 μm.

Naměřené hodnoty se pohybují v intervalu 0,2 - 0,4 μm. Lze také vypořadovat, že se zvyšující se řeznou rychlostí se drsnost obrobene plochy nepatrně zhoršuje. Při měření nebyla zjištěna závislost mezi opotřebením a naměřenou drsností. V závislosti na objemu odebraného materiálu se drsnost mění nepatrně. Při řezných rychlostech $v_c= 180 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a $v_c=200 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ můžeme pozorovat zlepšení drsnosti povrchu. Jedná se však o zanedbatelné zlepšení v setinách mikrometru. Lze tedy říci, že s objemem odebraného materiálu se drsnost obrobene plochy nemění. Důvodem je použití hladící geometrie břitu VBD.



Obr.38 Závislost drsnosti Ra na objemu odebraného materiálu při experimentálních podmínkách pre-experimentu

4.2.3 Celkové silové zatížení nástroje

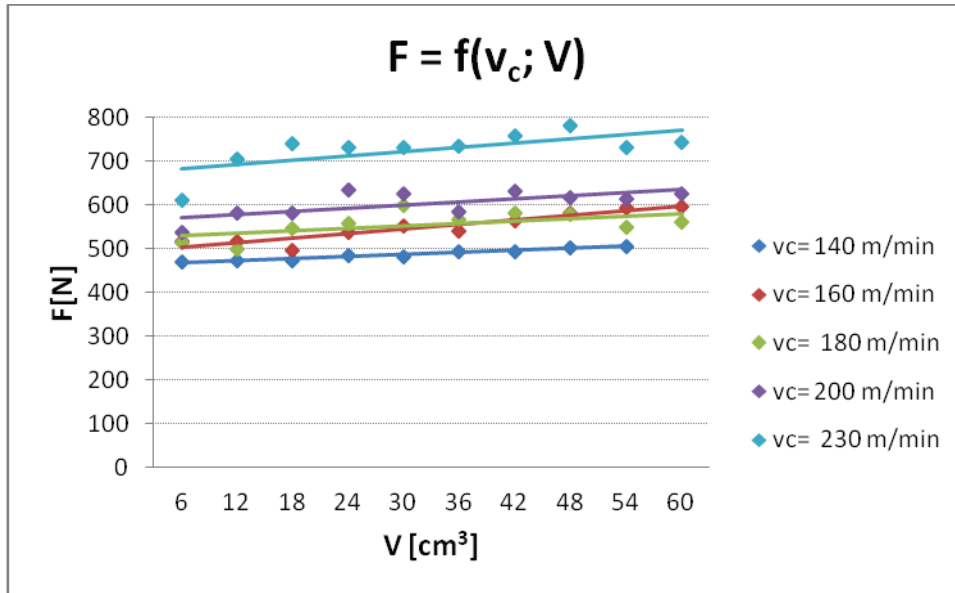
Silové zatížení ovlivňuje kvalitu řezného procesu. Ovlivněna je nejen trvanlivost, ale i produktivita a spolehlivost obrábění. Obecně je proto vhodné z hlediska hospodárnosti řezného procesu používat nástroje a řezné podmínky, které vykazují co nejmenší silové zatížení nástroje. [10]

V diplomové práci je hodnocení celkového silového zatížení nástroje provedeno sledováním celkového zatížení F[N]. Jedná se o výslednici hodnot naměřených při experimentu.

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad [N]$$

F celkové silové zatížení [N]
F_{x,y,z} složky řezné síly měřené v osách x,y,z [N]

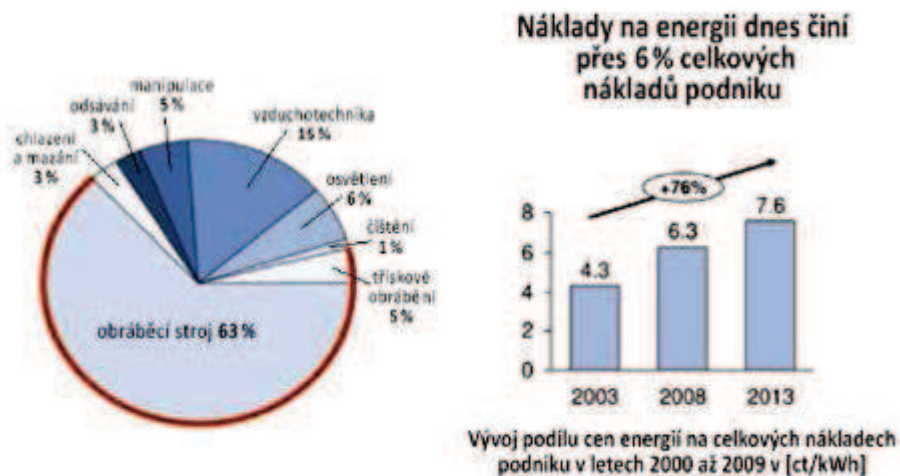
Silové zatížení bylo sledováno do hodnoty objemu odebraného materiálu $V=60\text{cm}^3$. Jedná se o hodnotu odpovídající jednomu z počátečních kritérií. Na obrázku 39 je zobrazen průběh silového zatížení nástroje. Jak lze z obrázku 39 vyzorovat silové zatížení roste s rostoucí hodnotou řezné rychlosti. Lze říci, že při porovnání růstu silového zatížení nástroje při jednotlivých řezných rychlostech je nárůst silového zatížení rovnoměrný. Růst silového zatížení je způsobem rostoucím opotřebením nástroje.



Obr.39 Závislost silového zatížení nástroje na objemu odebraného materiálu při experimentálních podmínkách pre-experimentu

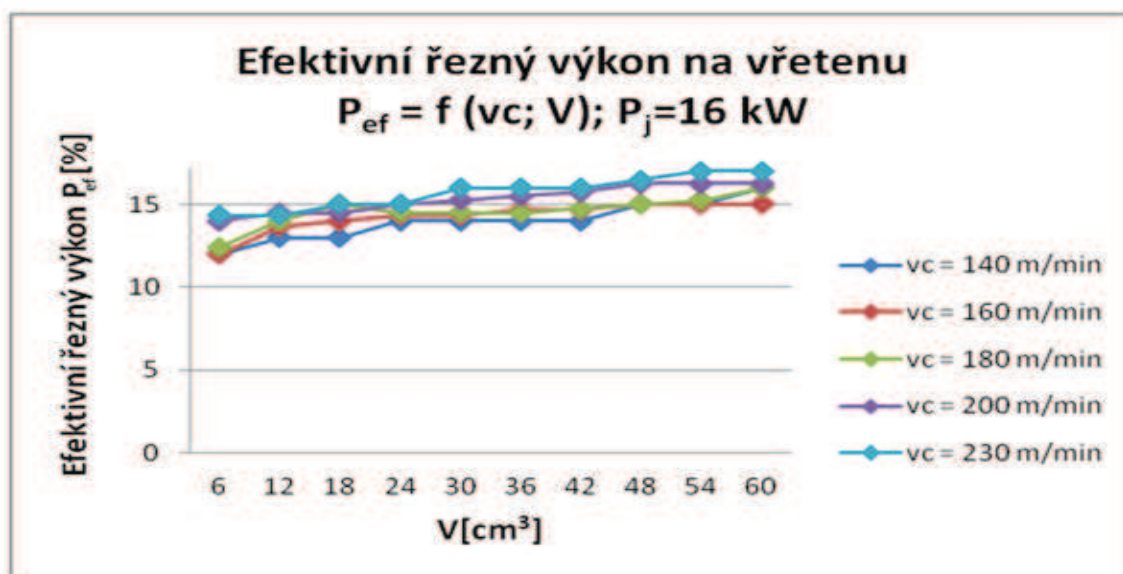
4.2.4 Efektivní řezný výkon na vřetenu stroje

V dnešní době se hledí nejen na hospodárnost, ale také na ekologii. Energetickou náročnost obráběcího procesu lze ovlivnit vhodnou volbou řezných podmínek. Výkon spotřebovaný pro řezný proces je tak přímo úměrný spotřebované energii. [10]



Obr.40 Spotřeba energie versus výrobní náklady[10]

Na obrázku 41 je zobrazen graf průběhu efektivního řezného výkonu v závislosti na objemu odebraného materiálu a řezné rychlosti. Je patrné, že se zvyšujícím se objemem odebraného materiálu a zvyšující řeznou rychlostí efektivní řezný výkon roste. Tyto poznatky úzce souvisí s již uvedenými poznatky o opotřebením nástroje. Zvyšující řezná rychlost negativně ovlivňuje opotřebením nástroje a tím i velikost jeho celkového silového zatížení. Nárůst celkového silového zatížení pak způsobuje zvýšení efektivního řezného výkonu na vřetenu stroje.



Obr.41 Průběh efektivního řezného výkonu na vřetenu stroje v závislosti na objemu odebraného materiálu (jmenovitý výkon stroje $P_j=16\text{kW}$)

4.2.5 Porovnání výsledků pre-experimentu

Při řezné rychlosti $v_c = 230 \text{ m/min}$ došlo k překročení kritéria opotřebením na čele řezného nástroje $KB_{krit} = 150 \mu\text{m}$. Ostatní kritéria nebyla překročena. Sledované parametry (opotřebením, celkové silové zatížení nástroje, efektivní řezný výkon na vřetenu stroje) měly podobné průběhy. Tyto parametry spolu úzce souvisí. Zvyšující řezná rychlost negativně ovlivňuje opotřebením nástroje a tím i velikost silového zatížení. Zvýšení silového zatížení má za důsledek zvýšení efektivního řezného výkonu na vřetenu stroje.

Vzhledem k počátečním kritériím a zadání plnění maximálních požadavků na řezný proces byla za nejvhodnější řeznou rychlost považována $v_c = 200 \text{ m/min}$.

4.3 Experiment

Pro experiment byl dle výsledků pre-experimentu a předcházející diplomové práce z projektu SGS-2012-023 Efektivní frézování těžkoobrobitelných feriticko-martenzitických ocelí zvolen vhodný poloměr zaoblení ostří $r_N=15 \mu\text{m}$.

Úkolem experimentální části bylo nalezení nejvhodnější úpravy řezné hrany mikrogeometrie ostří co se týče hospodárnosti řezného procesu. Pro porovnání byly nejdříve otestovány destičky bez úpravy (pouze přebroušené), následně byly testovány úpravy omíláním, suchým tryskáním, mokřým tryskáním a laserem. V závěru experimentu byly společně s dodavatelem VBD vytipovány destičky konkurence pro porovnání a následně byly tyto VBD otestovány a porovnány.

EXPERIMENTÁLNÍ PODMÍNKY EXPERIMENTU	
řezný materiál:	submikronový slinutý karbid IN04S
v_c [m.min ⁻¹]:	200
v_f [mm.min ⁻¹]:	3582
n [min ⁻¹]:	796
f_z [mm]:	4,5
r_N [μm]:	15 (pro úpravu laserem $r_N = 5 \mu\text{m}^*$)
a_p [mm]:	0,02
chlazení:	záplavové
počet VBD:	1
sousedné frézování	

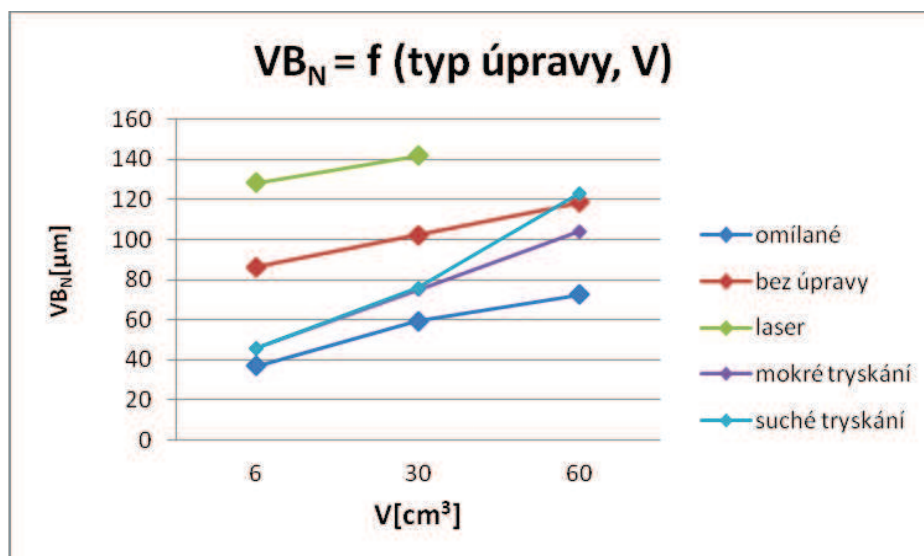
* Dodavatelem byly dodány destičky $r_N = 5 \mu\text{m}$, které byly změřeny až v laboratoři Katedry technologie obrábění. Z tohoto důvodu byly destičky s úpravou řezné hrany laserem otestovány s poloměrem $r_N = 5 \mu\text{m}$.

Tab.24 : Experimentální podmínky

4.3.1 Trvanlivost řezného nástroje

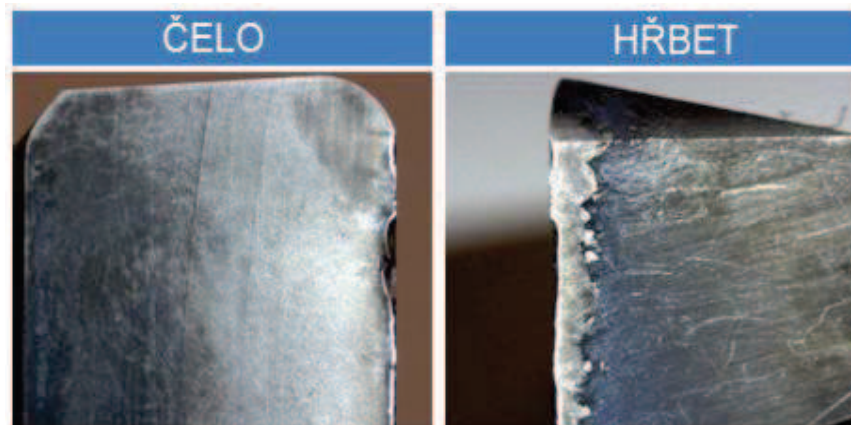
Jak bylo již uvedeno v kapitole 4.2.1 trvanlivost je přímo úměrná opotřebení nástroje. Trvanlivost lze ovlivnit také vhodnou úpravou zaoblení řezné hrany mikrogeometrie ostří.

Na obrázku 42 je zobrazena závislost opotřebení na hřbetě k objemu odebraného materiálu. Z grafu je patrné, že opotřebení se s objemem odebraného materiálu zvětšuje. U úpravy řezné hrany pomocí laseru došlo k překročení vše třech kritériálních hodnot (VB_N , V , R_a), proto nebyl dále testován. Tato úprava mikrogeometrie řezné hrany se prokázala jako nevhodná pro obrábění oceli P91. Jako nejvhodnější z hlediska opotřebení na hřbetu se prokázala úprava řezné hrany pomocí omíláním.

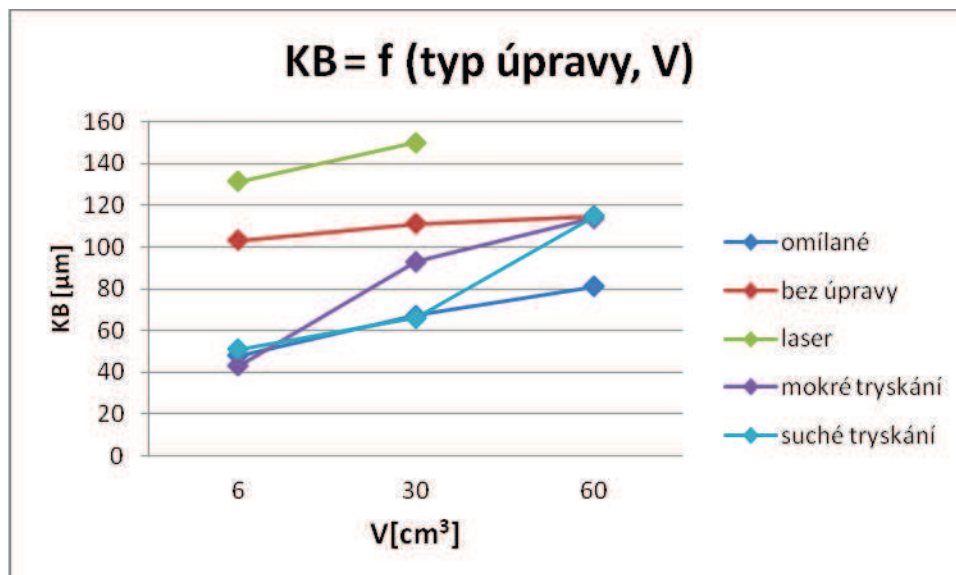


Obr.42 Závislost opotřebení na hřbetě při experimentálních podmínkách

Na obrázku 44 je zobrazena závislost opotřebení na čele při zvolených testovaných úpravách. Nevhodnost úpravy laserem je patrná překročením kritériální hodnoty opotřebení $KB_{krit}=0,150$ mm. Pro názornost jsou na obrázku 43 zobrazeny snímky opotřebení na hřbetě a na čele břitu řezného nástroje. Průběh opotřebení na čele a na hřbetu v závislosti na objemu odebraného materiálu je rostoucí, protože s objemem odebraného materiálu se opotřebení břitu nástroje zvyšuje. Nejmenší opotřebení bylo ověřeno úpravou řezné hrany omíláním



Obr.43 Opotřebení na čele a na hřbetu při úpravě řezné hrany laserem

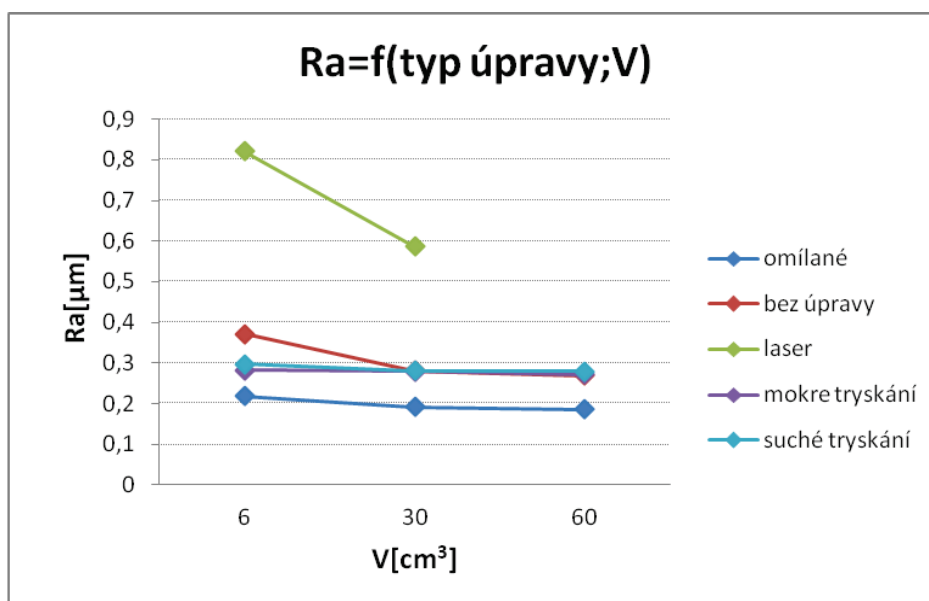


Obr.44 Závislost opotřebení na čele nástroje na objemu odebraného materiálu při experimentálních podmínkách

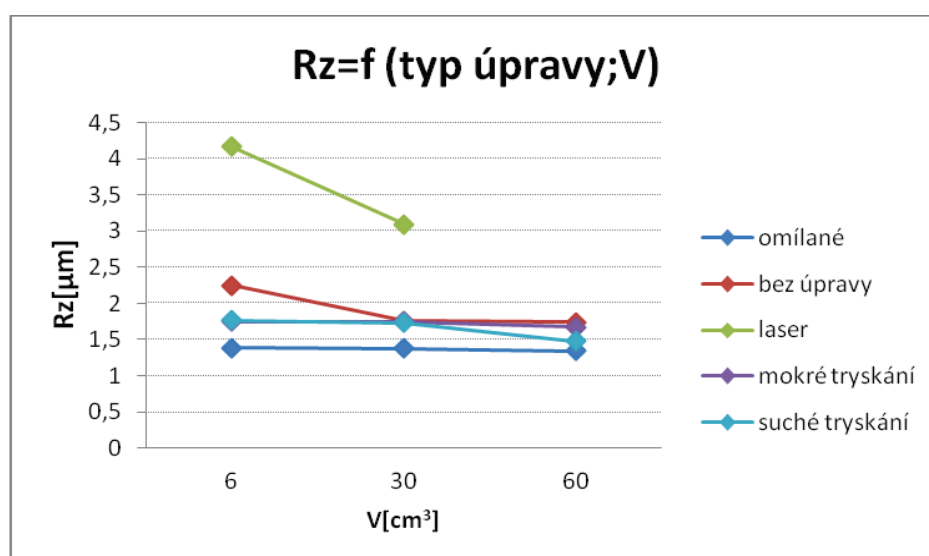
4.3.2 Drsnost

Drsnost povrchu byla v experimentu sledována pomocí parametrů Ra a Rz. Na obrázku 45 je znázorněna závislost drsnosti Ra na objemu odebraného materiálu pro jednotlivé metody úpravy řezné hrany a na obrázku 46 pak závislost drsnosti Rz na objemu odebraného materiálu pro jednotlivé metody úpravy řezné hrany. Mezi těmito údaji pro jeden povrch neexistuje žádný univerzální přepočít. Jak je možné z obrázku 45 vypočítat u úpravy laserem byla překročena kritériální hodnota drsnosti.

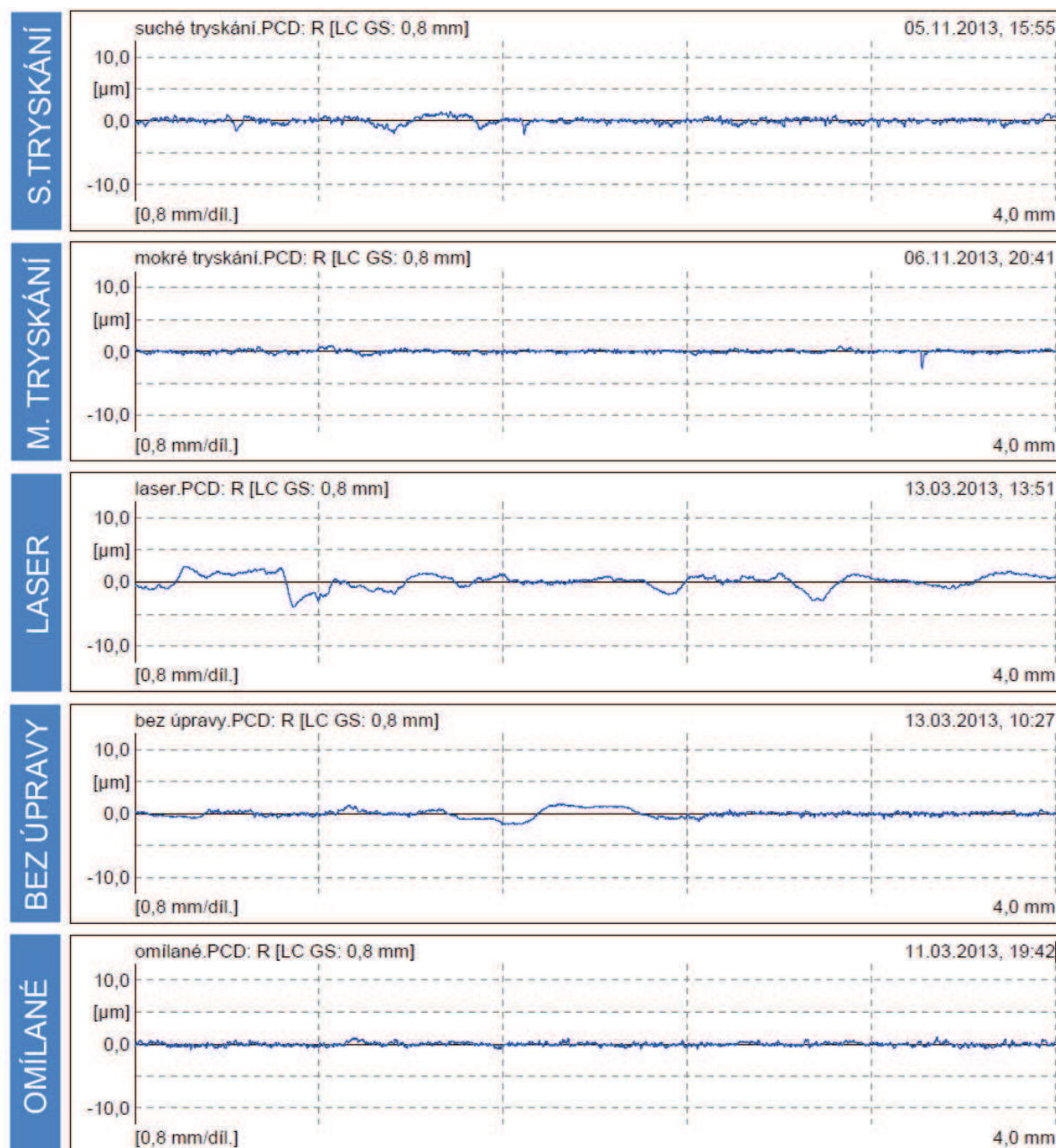
Na obrázku 47 je pro ukázkou znázorněn profil povrchu pro jednotlivé úpravy řezné hrany. Jak bylo již dříve uvedeno tato úprava laserem je pro obrábění P91 nevhodná. Jako nejvhodnější se prokazuje opět úprava řezné hrany omíláním a to jak při sledování parametru Ra, tak Rz.



Obr.45 Závislost drsnosti Ra na objemu odebraného materiálu při experimentálních podmínkách



Obr.46 Závislost drsnosti Rz na objemu odebraného materiálu při experimentálních podmínkách



Obr.47 Porovnání profilů povrchu při jednotlivých úpravách řezné hrany nástroje

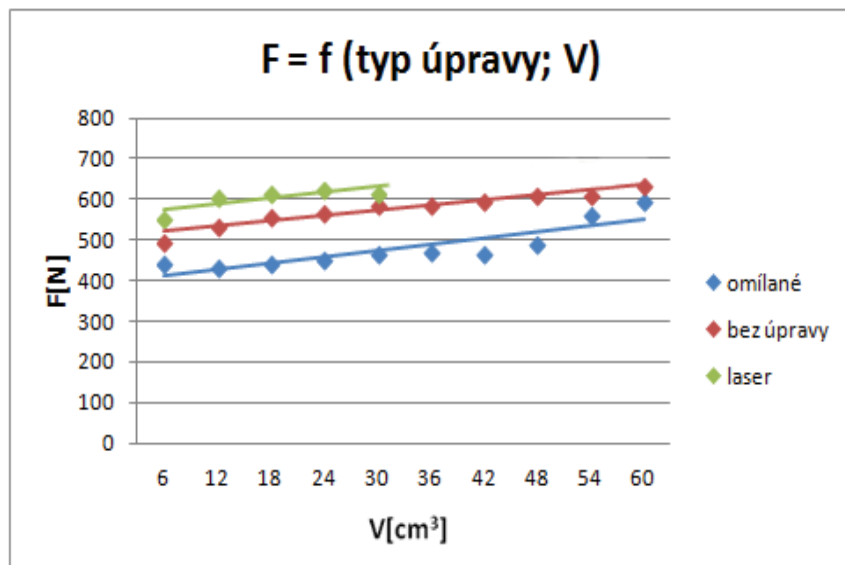
4.3.3 Celkové silové zatížení nástroje

Silové zatížení ovlivňuje produktivitu řezného procesu. Čím více je vřeteno stroje zatěžováno, tím větší potřebuje stroj příkon. Silové zatížení nástroje tak ovlivňuje hospodárnost řezného procesu. Způsob zjištění řezných sil byl popsán již v kapitole 4.2.3.

Na obrázku 48 je znázorněna závislost celkového silového zatížení nástroje v závislosti na objemu odebraného materiálu a jednotlivých úpravách. Silové zatížení nástroje s objemem odebraného materiálu roste. Tento růst je důsledkem zvyšujícího se opotřebení s objemem odebraného materiálu. Při zvýšení opotřebení roste celkové silové zatížení nástroje. Z ekonomických důvodů (náklady na výrobu polotovaru) a z důvodu nutnosti výměny

obrobku před testováním úpravy mikogeometrie ostří metodou mokrého a suchého tryskání nebylo celkové silové zatížení nástroje pro tyto úpravy měřeno. Celkové silové zatížení pro úpravu řezné hrany mokřým a suchým tryskáním bude měřeno v některé z navazujících prací na Katedře technologie obrábění Západočeské univerzity.

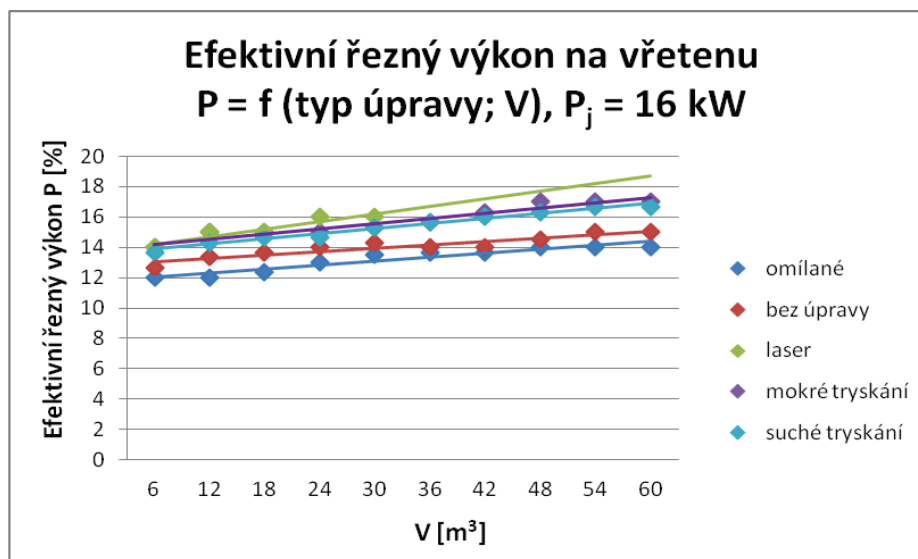
Jak je z grafu na obrázku 48 patrné, nejmenší celkové silové zatížení nástroje je při úpravě řezné hrany omíláním. Opět jako nejméně vhodná se prokázala úprava řezné hrany laserem.



Obr.48 Závislost silového zatížení nástroje na objemu odebraného materiálu při experimentálních podmínkách

4.3.4 Efektivní řezný výkon na vřetenu stroje

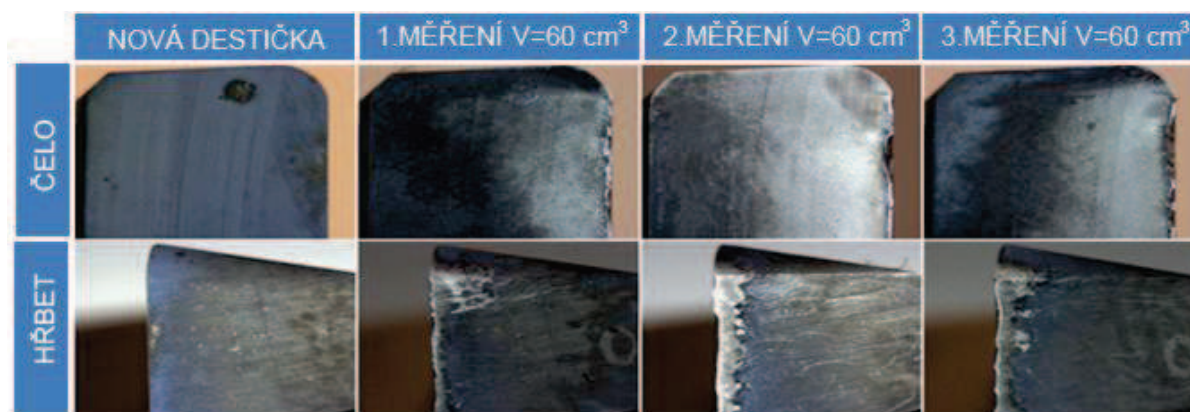
Efektivní řezný výkon je již popsán v kapitole 4.2.4. Graf efektivního řezného výkonu v závislosti na typu úpravy řezné hrany a odebraném objemu materiálu je znázorněn na obrázku 49. Jak je možné ze závislosti Efektivního řezného výkonu na objemu odebraného materiálu vypočítat, se zvyšujícím se objemem odebraného materiálu se efektivní řezný výkon zvyšuje.



Obr.49 Průběh efektivního řezného výkonu v závislosti na objemu odebraného materiálu při experimentálních podmínkách (jmenovitý výkon stroje $P_j=16\text{kW}$)

4.3.5 Porovnání výsledků experimentu

Jako naprosto nevhodná úprava se prokázala úprava mikrogeometrie řezné hrany laserem. Tato úprava nesplnila ani jednu z kritériálních podmínek. Na obrázku 50 jsou snímky opotřebení na hřbetu řezného nástroje a na čele řezného nástroje při úpravě laserem. Na obrázku je patrné opotřebení jak na čele, tak na hřbetu nástroje.



Obr.50 Snímky opotřebení ostří při úpravě mikrogeometrie laserem

Nejvhodnější úpravou z hlediska hospodárnosti procesu se prokázala úprava omíláním. Omílání bylo nejvhodnější ve všech sledovaných parametrech. V tabulce 24 je uvedeno porovnání výsledků experimentálně ověřených úprav. Pořadí je označené hvězdičkou (nejvhodnější úprava ***** až nedoporučená *).

Typ úpravy	Opotřebení VB _N	Opotřebení KB	Drsnost Ra	Drsnost Rz	Celkové silové zatížení	Efektivní řezný výkon
Bez úpravy	**	**	**	**	**	****
Omílané	*****	*****	*****	*****	***	*****
Laser	*	*	*	*	*	*
Mokrý tryskání	****	***	****	***	neměřeno	**
Suché tryskání	***	****	***	****	neměřeno	***

Tab.25 : Porovnání experimentálně ověřených úprav při experiment

4.3.6 Porovnání sledovaných úprav nástroje s nástrojem konkurenčního výrobce

Jak bylo v předchozí kapitole uvedeno dle výsledků experimentu lze za nejvhodnější považovat úpravu mikrogeometrie ostří omíláním. Pro experiment byly dle předchozích experimentů provedených v rámci řešení projektu SGS-2012-023:Efektivní frézování těžkoobrobitelných feriticko-martenzitických ocelí zvoleny VBD od firmy Ingersoll s řezným materiálem IN04s bez deponované vrstvy. Pro porovnání byly v závěru experimentu otestovány VBD firmy Mitsubishi a to VBD ze slinutého karbidu s označením WEEW13T3AGER8CHTi05T a VBD z cermetu WEEW13T3AGTR8CNX2525.

Tyto zvolené destičky byly upnuty do frézovací hlavy Mitsubishi ASX445-08OA06R (viz obrázek 51). Volba destiček proběhla na základě společného vtipování s dodavatelem nástrojů, při kterém bylo nutné brát ohled na malou hloubku řezu.

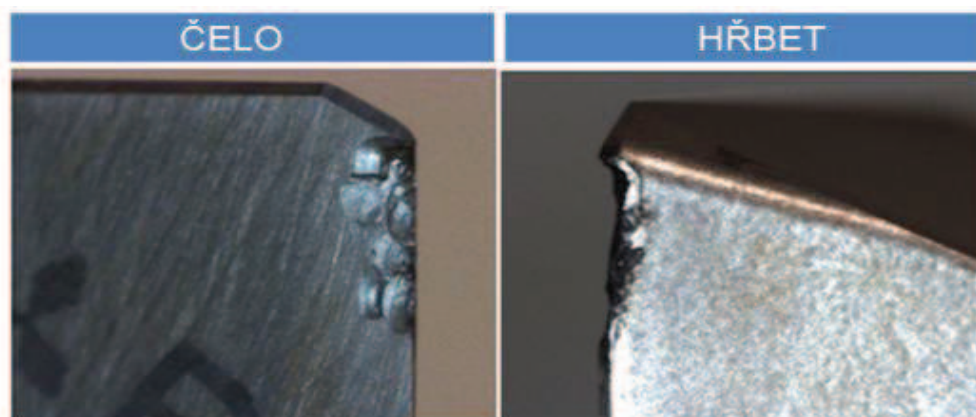


Obr.51 Frézovací hlava Mitsubishi ASX445-08OA06R

TESTOVANÉ ŘEZNÉ PODMÍNKY VBD CERMET NX2525			
Řezné podmínky	1.	2.	výrobce doporučené
v_c [m/min]:	270	200	270
n [ot/min]:	1080	796	1080
f_z [mm/z]:	4,5	1	0,2
v_f [mn/min]:	4860	796	216
a_p [mm]:	0,02	0,02	0,02
Počet VBD:	1		
chlazení záplavové			

Tab.26 : Testované řezné podmínky VBD NX2525

Cermetová VBD od firmy Mitsubishi s označením NX2525 byla testována při dvou kombinacích řezných podmínek a jako třetí měření při řezných podmínkách doporučených výrobcem. Testované řezné podmínky jsou uvedeny v tabulce 26. Při testování cermetové VBD došlo k překročení kritériálních hodnot opotřebení již při dosažení objemu odebraného materiálu $V=6\text{cm}^3$ ve všech třech případech řezných podmínek. Vyjma doporučených řezných podmínek výrobcem byla při dosažení objemu odebraného materiálu $V=6\text{cm}^3$ překročena také kritériální hodnota drsnosti obrobeného povrchu. Na obrázku 52 je zobrazeno opotřebení ostří při testovaných řezných podmínkách doporučených od výrobce. Z obrázku 52 je patrné vyštípnutí řezné hrany VBD.



Obr.52 Opotřebení ostří VBD Mitsubishi NX2525 při testovaných řezných podmínkách doporučených od výrobce

V tabulce 27 jsou zobrazeny naměřené hodnoty opotřebení, drsnosti obrobeného povrchu, celkového silového zatížení a efektivního řezného výkonu na vřetenu stroje při jednotlivých řezných podmínkách. Z důvodu překročení kritériálních hodnot již při objemu odebraného materiálu $V=6\text{cm}^3$ jsou tyto hodnoty průměrné při tomto objemu odebraného materiálu.

NAMĚŘENÉ HODNOTY PRO VBD CERMET NX2525			
Řezné podmínky	1.	2.	výrobce doporučené
Opotřebení KB[μm]:	452	1002	482
Opotřebení VB _N [μm]:	306	429	342
Drsnost Ra [μm]:	1,526	0,909	0,278
Celkové silové zatížení F[N]:	1024	298	189
Efektivní řezný výkon P _{ef} [%]:	13	6	6

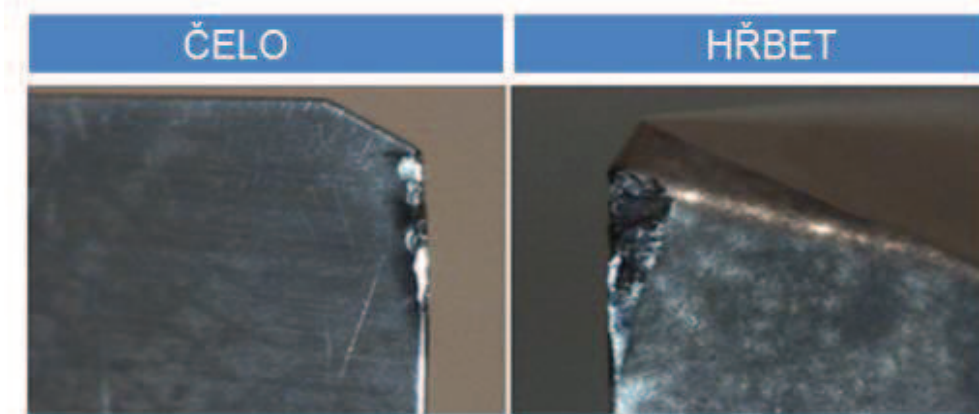
Tab.27 : Naměřené hodnoty pro VBD NX2525
(průměrné hodnoty při objemu odebraného materiálu V=6cm³)

VBD od firmy Mitsubishi ze slinutého karbidu s označením HTi05T byla testována stejně jako cermetová VBD při dvou kombinacích vytípaných řezných podmínek a při řezných podmínkách doporučených výrobcem. Všechny testované řezné podmínky pro VBD ze slinutého karbidu jsou uvedeny v tabulce 28.

TESTOVANÉ ŘEZNÉ PODMÍNKY VBD ze slinutého karbidu HTi05T			
Řezné podmínky	1.	2.	výrobce doporučené
v _c [m/min]:	270	200	150
n [ot/min]:	1080	796	597
fz [mm/z]:	4,5	1	0,3
vf [mn/min]:	4860	796	179
ap [mm]:	0,02	0,02	0,02
Počet VBD:	1		
chlazení záplavové			

Tab.28 : Testované řezné podmínky VBD HTi05T

Opotřebení bylo naměřeno sice menší než u cermetové VBD, ale i přesto byla překročena kritériální hodnota opotřebení na hřbetu a čele řezného břitů, vyjma kombinace řezných podmínek číslo 2 (viz tabulka 29). U těchto řezných podmínek nebyla překročena kritériální hodnota opotřebení na čele. Kritériální hodnota drsnosti obrobeného povrchu byla překročena při řezných podmínkách 1. a 2. (viz tabulka 29), při řezných podmínkách doporučených výrobcem byla tato hodnota dodržena. Na obrázku 53 je znázorněno opotřebení ostří při řezných podmínkách doporučených výrobcem. Tak jako v případě cermetové VBD je patrné vyštípnutí řezné hrany VBD.



Obr.53 Opotřebení ostří VBD Mitsubishi HTi05T při testovaných řezných podmínkách doporučených od výrobce

NAMĚŘENÉ HODNOTY PRO VBD ze slinutého karbidu HTi05T			
Řezné podmínky	1.	2.	výrobce doporučené
Opotřebení KB[μm]:	237	129	192
Opotřebení VB _N [μm]:	346	419	544
Drsnost Ra [μm]:	2,306	2,231	0,685
Celkové silové zatížení F[N]:	832	265	229
Efektivní řezný výkon P _{ef} [%]:	16	6	3

Tab.29 : Naměřené hodnoty pro VBD HTi05T
(průměrné hodnoty při objemu odebraného materiálu $V=6\text{cm}^3$)

Porovnáním s konkurencí byla ověřena vhodnost zvolené VBD Ingersoll IN04s. Porovnávané destičky Mitsubishi Ti05T a Mitsubishi NX2525 dosáhly kritériálních hodnot již při dosažení objemu odebraného materiálu $V=6\text{cm}^3$. Ačkoli byly vytipovány ve spolupráci s dodavatelem VBD Mitsubishi nedosahují takové kvality obrobeného povrchu jako námi vytipovaná VBD Ingersoll IN04s s úpravou řezné hrany omíláním. Dodavatelem vytipované VBD Mitsubishi nejsou pro obrábění oceli P91 za daných řezných podmínek vhodné. Při daných řezných podmínkách bylo obrábění neproduktivní a bylo dosaženo nízké kvality obrobeného povrchu.

5 Závěr

Tématem diplomové práce bylo efektivní frézování feriticko-martenzitických ocelí: vliv úpravy ostří na řezný proces. Diplomová práce byla řešena v rámci projektu SGS-2012-023 Efektivní frézování těžkoobrobitelných feriticko-martenzitických ocelí. Hlavním úkolem a cílem práce bylo navržení a experimentální úpravy mikrogeometrie řezné hrany s ohledem na hospodárnost řezného procesu tak, aby byly maximálně plněny požadavky kladené na řezný proces a na jeho výsledky. Dalším cílem bylo sumarizovat informace a získat teoretické podklady k sledované problematice.

Sumarizace informací a získání teoretických podkladů byla vzhledem k dané problematice obtížná. Příliš mnoho literatury se obrábění oceli P91 nevěnuje. Díky tomu byla tato část práce časově náročnější než samotný experiment. Pro sumarizaci byly využity jak tuzemské, tak zahraniční zdroje. Důležitým zdrojem byly také již hotové bakalářské a diplomové práce.

Diplomová práce byla navazující prací na diplomovou práci Jan Petele: Efektivní frézování feriticko-martenzitických ocelí - vliv mikrogeometrie nástroje na řezný proces. Nejdříve byla z pre-experimentu experimentálně ověřena vhodná řezná rychlost. Následně byl z diplomové práce Jana Peteleho použit nalezený vhodný poloměr zaoblení řezné hrany břitu. Na vhodný poloměr byly vytipovány úpravy řezných hran mikrogeometrie řezné hrany a následně byla nalezena nejvhodnější úprava s ohledem na hospodárnost řezného procesu.

Pro pre-experiment a experiment byly určeny tři kritéria. První kritérium byla trvanlivost nástroje, kde byla stanovena kritériální hodnota $VB_{krit} / KB_{krit} = 0,150$ mm. Další z kritérií bylo dosažení drsnosti R_a , odpovídající méně než $0,8 \mu\text{m}$. Třetí z kritérií bylo dosažení objemu odebraného materiálu $V=60\text{cm}^3$. Výsledkem pre-experimentu byla nejvhodnější řezná rychlost $v_c=200\text{m/min}$.

Pro experimentální část byly zvoleny úpravy laserem, omíláním, suchým tryskáním, mokřím tryskáním a pro porovnání destičky bez úpravy (pouze přebroušené). Tato volba úprav vycházela z předchozích experimentů prováděných na Katedře technologie obrábění Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni. VBD byly porovnávány pomocí opotřebení, parametrů drsnosti povrchu, celkového silového zatížení a efektivního řezného výkonu. Průběh experimentu ukázal, že nejvhodnější úprava řezné hrany ostří je úprava omíláním. Jako naprosto nevhodná se ukázala úprava řezné hrany laserem. Při obrábění VBD s úpravou řezné hrany laserem docházelo k vylamování řezné hrany. Důvodem je vliv úpravy řezné hrany laserem, díky kterému dochází k tepelnému ovlivnění oblasti řezné hrany a následně k jejímu zkřehnutí. V závěru experimentu byly společně s dodavatelem VBD vytipovány destičky konkurence pro porovnání a následně byly tyto VBD otestovány a porovnány. Dodavatelem vytipované VBD jsou při daných řezných podmínkách pro obrábění oceli P91 nevhodné.

Použitá literatura

- [1] JANDA, Z.: *Anotace k projektu SGS-2012-023 Efektivní frézování těžkoobrobitelných feriticko-martenzitických ocelí*; ZČU v Plzni; 2012
- [2] ŘEHOŘ, J., NIKL, T.: *Produktivní obrábění oceli P91*; ZČU v Plzni; 2011; online dostupný z: <http://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/20-2011/pdf/009-013.pdf>
- [3] *Korozivzdorná ocel*; [cit. 2013-09-30] online dostupný z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Korozivzdorn%C3%A1_ocel
- [4] *Korozivzdorné oceli jako konstrukční materiály*; [cit. 2013-10-18] online dostupný z: http://www.ateam.zcu.cz/korozivzdorne_oceli_3.pdf
- [5] PEŠA, J.; PACHOLKOVÁ, Š.: *Možnosti výroby dvoufázových feriticko-martenzitických ocelí v NH, a.s.*; VZÚ Nová Huť a.s.; 2000; online dostupný z: <http://konference.tanger.cz/data/metal2000/sbornik/papers/241.pdf>
- [6] *Antikorózní a žiaruvzdorné ocele*; [cit. 2013-09-17] online dostupný z: http://kmi2.uniza.sk/wp-content/uploads/2010/10/K-3.pred_.pdf
- [7] SANDVIK COROMANT; *ISO M Korozivzdorné oceli*; [cit. 2013-10-10] online dostupný z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_m_stainless_steel/pages/default.aspx
- [8] SANDVIK COROMANT; *Obrobitelnost-definice* [cit. 2013-09-17] online dostupný z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/machinability_definition/pages/default.aspx
- [9] SANDVIK COROMANT; *Skupiny obráběných materiálů*; [cit. 2013-09-17] online dostupný z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/workpiece_material_groups/pages/default.aspx
- [10] JANDA, Z.: *Studie problematiky frézování feriticko-martenzitické oceli P91*; Disertační práce; ZČU v Plzni; 2012
- [11] VLČEK, L., Barák J.: *Ocel P91*; prezentace z předmětu ST; ZČU v Plzni; 2011
- [12] *P91 material data sheet*; [cit. 2013-11-17] online dostupný z: http://www.s-k-h.com/media/de/Service/Werkstoffblaetter_englisch/Kesselrohre_ASTM/P91_T91_engl.pdf
- [13] HOCHMAN, A.: *Progresivní frézování feriticko-martenzitické oceli P91*; Diplomová práce; ZČU v Plzni; 2010
- [14] KOUTSKÝ, J. *Materiály tepelně-energetických zařízení*. ZČU Plzeň, 1991
- [15] *Lavesovy fáze*; [cit. 2013-11-22] online dostupný z: http://www.cojeco.cz/index.php?id_desc=52081&s_lang=2&detail=1&title=Lavesovy+f%E1ze
- [16] NIKL, T.: *Produktivní obrábění oceli P91 - dokončování dělicí roviny turbínových těles*; Diplomová práce; ZČU v Plzni; 2011
- [17] *Technologie úprav nástrojů před a po povlakování*; [cit. 2013-11-22] online dostupný z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-uprav-nastroju-pred-a-po-povlakovani.html>
- [18] ŠUBRT, O.: *Zvyšování řezivosti HSS nástrojů při obrábění oceli třídy 15*; Diplomová Práce; ZČU v Plzni; 2011
- [19] PAVELKA, R.: *Analýza vyměnitelných břitových destiček ze slinutých karbidů*; Diplomová práce; VUT Brno; 2010

- [20] MALÝ, J.: *Úprava a měření mikrogeometrie břitů nástroje*; Bakalářská práce; ZČU v Plzni; 2012
- [21] MUŽÍK, J.: *Návrh přípravků pro úpravu a měření mikrogeometrie břitů*; Diplomová práce; ZČU v Plzni; 2012
- [22] MOSER M., *The Importance of Cutting Edge Preparation In Metal Cutting Technology*. Dostupné z:
[http://www.edeltec.com/usuaris/UserFilesfck/File/otec/OTEC%20The%20Importance%20of%20Cutting%20Edge%20Preparation%20\(for%20customers\)%2012-06.html](http://www.edeltec.com/usuaris/UserFilesfck/File/otec/OTEC%20The%20Importance%20of%20Cutting%20Edge%20Preparation%20(for%20customers)%2012-06.html)
- [23] *Úprava břitů a povrchů nástrojů*; [cit. 2013-11-17] online dostupný z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/upravy-britu-a-povrchu-reznych-nastroju.html>
- [24] MUSIL, M.: *Příprava rezného nástroje před povlakováním*; Bakalářská práce; VUT Brno; 2010
- [25] RODRÍGUEZ, Carlos Julio Cortés: *Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro- abrasive jet machining and brushing*; Kassel: Kassel university press, 2009 [cit. 2014-01-02] online dostupný z: <http://www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-89958-712-8.volltext.frei.pdf>. ISBN 978-3-89958-712-8.
- [26] *Mechanická úprava monolitních nástrojů před PVD povlaky*; [cit. 2013-02-04] online dostupný z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/mechanicka-uprava-monolitnich-nastroju-pred-pvd-povlaky.html>
- [27] *Lasery, laserové technologie a stroje s laserem*; [cit. 2014-02-04] online dostupný z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem.html>
- [28] INGERSOLL: katalog firmy; 2013; [cit. 2014-02-08] online dostupný z:
http://www.ingersoll-imc.com/en/catalogs/pdfs/7350852_Brochure.pdf
- [29] *Zkouška trvanlivosti ostří*; [cit. 2013-09-20] online dostupný z:
<http://home.zcu.cz/~spirit/>
- [30] *Experimentální metody obrábění*; přednášky z předmětu EMO; přednášející Doc. Řehoř; ZČU v Plzni; 2012
- [31] *Chyby měření – základní pojmy*; [cit. 2014-04-24] online dostupný z:
http://www.fjfi.cvut.cz/files/k402/pers_hpgs/skoda/prime_mereni1.pdf
- [32] ZETEK, M.: *Zvyšování řezivosti nástrojů pomocí PVD technologií*; Disertační práce; ZČU v Plzni; 2010
- [33] PETELE, J.: *Efektivní frézování feriticko-martenzitických ocelí - vliv mikrogeometrie nástroje na rezný proces*; Diplomová práce; ZČU v Plzni; 2013

Seznam obrázků

Obr.1 Materiály pro obrábění dle normy ISO [9].....	17
Obr.2 Poměrná obrobiteľnosť korozivzdorných ocelí [7].....	18
Obr.3 Mikrostruktura oceli P91 [13].....	20
Obr.4 Typy opotrebení [24].....	23
Obr.5 Typy opotrebení řezného břitu [19].....	23
Obr.6 Procenta realizovaných zakázek úprav mikrogeometrie ostří firmy Platit [21].....	24
Obr.7 Schéma břitu nástroje [23].....	25
Obr.8 Charakteristika úpravy hrany řezného ostří [22].....	25
Obr.9 Kartáčovací stroj pro nástroje GERBER [24].....	26
Obr.10 Pracovní prostor kartáčovacího stroje GERBER pro nástroje [24].....	26
Obr.11 Kartáčování hran VBD [20].....	27
Obr.12 Působení magnetického leštění na strukturu povrchu [25].....	27
Obr.13 Průběh kr. momentu u neupraveného a magneticky upraveného nástroje [23].....	28
Obr.14 Pohled do zařízení omílání v granulátech [20].....	29
Obr.15 Břit před a po omílání [26].....	30
Obr.16 Kontura povrchu po úpravě řezné hrany omíláním [21].....	30
Obr.17 Systém pro mikro-otryskávání proudem abraziva [20].....	31
Obr.18 Šíření trhliny při procesu MOPA [20].....	32
Obr.19 Povrch VBD po mikro-otryskávání proudem abraziva [25].....	32
Obr.20 MOPA uspořádání vybavení [20].....	33
Obr.21 Schéma laseru CO ₂ [27].....	34
Obr.22 Schéma laseru YAG [27].....	34
Obr.23 Schéma průběhu odebírání materiálu laserem CO ₂ [20].....	35
Obr.24 Vertikální obráběcí centrum MCV 750 A.....	36
Obr.25 Frézovací hlava Ingersoll 6F2B080R00 [10].....	37
Obr.26 Rozměry frézovací hlavy Ingersoll 6F2B080R00 [28].....	37
Obr.27 Vyměnitelná břitová destička Ingersoll YDA323L104 [28].....	38
Obr.28 Drsnoměr Mahr MarSurf M300	39
Obr.29 Mikroskop Blickle MULTICHECK PC 500	40
Obr.30 Třísloužkový dynamometr Kistler 9255a [29].....	41
Obr.31 Příslušenství pro třísloužkový dynamometr Kistler použité při experimentu [13]..	42
Obr.32 Schéma experimentálních zátěžových podmínek [10].....	43
Obr.33 Rozmístění oblastí náměrů na obrobku	43
Obr.34 Otupení břitu řezného nástroje na čele po obrábění bez chlazení.....	46
Obr.35 Závislost opotřebení na čele řezného nástroje po frézování bez chlazení.....	46
Obr.36 Závislost opotřebení na hřbetě k objemu odebraného materiálu	47
Obr.37 Závislost opotřebení na čele k objemu odebraného materiálu.....	47
Obr.38 Závislost drsnosti Ra na objemu odebraného materiálu.....	48
Obr.39 Závislost silového zatížení nástroje na objemu odebraného materiálu.....	49
Obr.40 Spotřeba energie versus výrobní náklady[10].....	49
Obr.41 Průběh efekt. řezného výkonu v závislosti na objemu odebraného materiálu.	50
Obr.42 Závislost opotřebení na hřbetě k objemu odebraného materiálu.....	51
Obr.43 Opotřebení na čele a na hřbetě při úpravě řezné hrany laserem.....	52
Obr.44 Závislost opotřebení na čele břitu k objemu odebraného materiálu	52
Obr.45 Závislost drsnosti Ra na objemu odebraného materiálu	53
Obr.46 Závislost drsnosti Rz na objemu odebraného materiálu	53
Obr.47 Porovnání profilu povrchu při jednotlivých úpravách řezné hrany nástroje.....	54
Obr.48 Závislost silového zatížení nástroje na objemu odebraného materiálu	55

Obr.49 Průběh efekt. řezného výkonu v závislosti na objemu odebraného materiálu	56
Obr.50 Snímky opotřebení ostří při úpravě mikroeometrie laserem.....	56
Obr.51 Frézovací hlava Mitsubishi ASX445-08OA06R.....	57
Obr.52 Opotřebení ostří VBD NX2525 při test. řez. podmínkách od výrobce.....	58
Obr.53 Opotřebení ostří VBD HTi05T při test. řez. podmínkách od výrobce.....	59

Seznam tabulek

Tab.1: Obvyklé složení austenitických korozivzdorných ocelí [3].....	12
Tab.2: Tři základní skupiny austenitických korozivzdorných ocelí [3].....	12
Tab.3: Obvyklé složení martenzitických korozivzdorných ocelí [4].....	13
Tab.4: Tři základní skupiny martenzitických korozivzdorných ocelí [4].....	14
Tab.5: Obvyklé složení feritických korozivzdorných ocelí [4].....	14
Tab.6: Základní skupiny feritických korozivzdorných ocelí [3,4].....	15
Tab.7: Obvyklé složení austeniticko-feritických korozivzdorných ocelí [3].....	16
Tab.8: Obvyklé složení feriticko-martenzitických korozivzdorných ocelí [6].....	16
Tab.9: Chemické složení oceli P91 [12].....	19
Tab.10: Popis Lavesových fází [10,15].....	21
Tab.11: Mechanické vlastnosti oceli P91 při zvýšené teplotě [13].....	21
Tab.12: Základní mechanismy opotřebení nástroje [18].....	22
Tab.13: Hlavní používané typy omílacích tělísek [24].....	29
Tab.14: Hlavní výhody suchého tryskání [24].....	30
Tab.15: Hlavní výhody mokrého tryskání [24].....	31
Tab.16: Základní technické údaje Vertikální obráběcí centrum MCV 750.....	36
Tab.17: Rozměry frézovací hlavy Ingersoll 6F2B080R00.....	37
Tab.18: Základní technické údaje drsnoměr Mahr MarSurf M300.....	39
Tab.19: Základní technické údaje mikroskop Blickle MULTICHECK PC 500.....	40
Tab.20: Základní technické údaje Třísložkový dynamometr Kistler 9255a.....	41
Tab.21: Použité příslušenství k třísložkovému dynamometru Kistler 9255a [19].....	41
Tab.22 : Experimentální kritéria pro pre-experiment a experiment.....	44
Tab.23 : Experimentální podmínky pre-experimentu.....	45
Tab.24: Experimentální podmínky experimentu.....	51
Tab.25 : Porovnání experimentálně ověřených úprav při experiment.....	56
Tab.26 : Testované řezné podmínky VBD NX2525.....	57
Tab.27 : Naměřené hodnoty pro VBD NX252.....	58
Tab.28 : Testované řezné podmínky VBD HTi05T.....	58
Tab.29 : Naměřené hodnoty pro VBD HTi05T.....	59

PŘÍLOHA č. 1

Kritické hodnoty T_α a Q_α pro vylučování odlehlých výsledků.

Kritické hodnoty T_α a Q_α pro vylučování odlehlých výsledků.

/zdroj: <http://ach.upol.cz/ucebnice/tab2.htm/>

Počet stanovení n	T_α		Q_α	
	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
3	1,412	1,416	0,941	0,988
4	1,689	1,723	0,765	0,889
5	1,869	1,955	0,642	0,760
6	1,996	2,130	0,560	0,698
7	2,093	2,265	0,507	0,637
8	2,172	2,374	0,468	0,590
9	2,237	2,464	0,437	0,555
10	2,294	2,540	0,412	0,527
11	2,343	2,606		
12	2,387	2,663		
13	2,426	2,714		
14	2,461	2,759		
15	2,493	2,800		
16	2,523	2,837		
17	2,551	2,871		
18	2,557	2,903		
19	2,600	2,932		
20	2,623	2,959		