

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303T004 Strojírenská technologie – technologie obrábění

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Efektivní frézování feriticko-martenzitických ocelí  
vliv mikrogeometrie nástroje na řezný proces

Autor: **Jan PETELE**

Vedoucí práce: **Ing. Zdeněk Janda, Ph.D.**

Akademický rok 2012/2013

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan PETELE**  
Osobní číslo: **S11N0049P**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**  
Název tématu: **Efektivní frézování feriticko-martenzitických ocelí: vliv mikro-geometrie nástroje na řezný proces**  
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

### Zásady 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

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**

Rozsah pracovní zprávy: **50 - 70 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tisknutá**

Seznam odborné literatury:

**Sandvik Coromant : Technická příručka obrábění; 2005**

**Sandvik Coromant : Příručka obrábění; 2011**

**CIRP ANNALS : Manufacturing Technology: (<http://www.cirp.net/>) a další elektronické zdroje viz <http://knihovna.zcu.cz>**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Janda, Ph.D.**

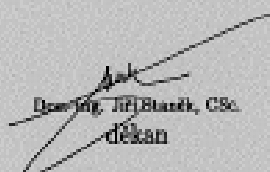
Katedra technologie obrábění

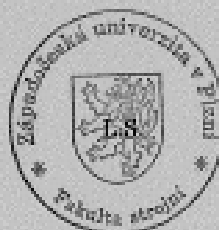
Konzultant diplomové práce: **Ing. Zdeněk Janda, Ph.D.**

Katedra technologie obrábění

Datum zadání diplomové práce: **29. října 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2013**

  
Doc. Ing. Jiří Štaněk, CSc.  
děkan



  
Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 19. listopadu 2012

## Garance a vedení diplomové práce

Vedoucí katedry:	Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.	ZČU v Plzni, FST-KTO
Vedoucí dipl. práce:	Ing. Zdeněk Janda, Ph.D.	ZČU v Plzni, FST-KTO
Konzultant dipl. práce:	Ing. Jaroslava Fulemová	ZČU v Plzni, FST-KTO

## Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, která byla zpracována na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a zdrojů uvedených v seznamu, které jsou součástí této diplomové 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 jakékoli nakládání s nimi, možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

## Poděkování

Tato diplomová práce vznikla v rámci řešení grantu SGS-2012-023 - Efektivní frézování těžkoobrobitelných feriticko-martenzitických ocelí.

Diplomová práce vznikla také za podpory projektu ESF OP VpK „Posílení spolupráce mezi vysokými školami, výzkumnými ústavami 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.

Poděkování patří také vedoucímu DP - Ing. Zdeňku Jandovi, Ph.D. za tématické vedení a Ing. Jaroslavě Fulemové za pomoc s praktickými experimenty.

Rád bych také poděkoval všem pedagogickým pracovníkům Západočeské univerzity, kteří mě během studia vedli a předávali mi své znalosti a zkušenosti.

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Petele	<b>Jméno</b> Jan	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2303T004 „Strojírenská technologie – technologie obrábění“		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulu)</b> Ing. Janda, Ph.D.	<b>Jméno</b> Zdeněk	
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KTO		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Efektivní frézování feriticko-martenzitických ocelí: vliv mikrogeometrie nástroje na řezný proces		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2013
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	62	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	49	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	13
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<b>STRUČNÝ POPIS</b>  <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Diplomová práce se zabývá efektivním frézováním feriticko-martenzitických ocelí, konkrétně vlivem mikrogeometrie nástroje na řezný proces. Především vlivem poloměru zaoblení ostří na řezný proces. Pozorování řezného procesu a následné hodnocení vlivů bylo prováděno při experimentálním obrábění feriticko-martenzitické oceli, která byla obráběna nástroji s různými mikrogeometriemi ostří.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>  <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	Feriticko-martenzitická ocel, mikrogeometrie nástroje, opotřebení

## SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Petele	<b>Name</b> Jan
<b>FIELD OF STUDY</b>	2303T004 “ Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting“	
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Ing. Janda, Ph.D.	<b>Name</b> Zdeněk
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KTO	
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b> <b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Effective Milling ferritic-martensitic steels: impact of micro-geometry tools for cutting process	

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Technology of Metal Cutting	<b>SUBMITTED IN</b>	2013
----------------	------------------------	-------------------	-----------------------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	62	<b>TEXT PART</b>	49	<b>GRAPHICAL PART</b>	13
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION</b>  <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	Diploma thesis deals with efficient milling ferritic-martensitic steels, namely the influence of micro-geometry tools during cutting process. Mainly the influence of cutting edge radius on the cutting process. Observation of the cutting process and the subsequent impact assessment has been carried out in experimental machining ferritic-martensitic steel, that was machined with tools with different cutting edge micro-geometry.
<b>KEY WORDS</b>	Ferritic-martensitic steel, micro-geometry of the tools, wear

## Obsah

Obsah.....	5
1 Úvod.....	9
2 Rozbor materiálu.....	10
2.1 Typy korozivzdorných ocelí.....	10
2.1.1 Feritické oceli.....	10
2.1.2 Martenzitické oceli.....	11
2.1.3 Austenitické oceli.....	12
2.1.4 Dvoufázové (duplexní) korozivzdorné oceli.....	12
2.1.4.1 Austeniticko-feritické oceli.....	12
2.1.4.2 Martenziticko-austenitické oceli.....	13
2.1.4.3 Feriticko-martenzitické oceli.....	13
2.1.5 Precipitačně vytvrditelné korozivzdorné oceli.....	13
2.2 Charakteristika struktury feriticko-martenzitických ocelí.....	14
2.3 Chemické složení.....	16
2.4 Vliv legujících prvků.....	17
2.5 Mechanické vlastnosti FM ocelí v závislosti na teplotě.....	18
2.6 Doporučení pro obrábění korozivzdorných ocelí.....	18
3 Geometrie nástroje.....	19
3.1 Hladící geometrie wiper.....	19
3.2 K faktor.....	21
3.3 Úpravy řezné hrany.....	23
3.3.1 Vlečné omílání.....	23
3.3.2 Úprava laserem.....	23
3.3.3 Další používané technologie.....	24
4 Vliv poloměru zaoblení ostří na řezný proces.....	25
4.1 Vliv poloměru zaoblení ostří na trvanlivost břitu.....	25
4.1.1 Vliv geometrie břitu na trvanlivost břitu.....	25
4.1.2 Další vlivy působící na trvanlivost břitu.....	26
4.1.3 Závislost trvanlivosti nástroje na poloměru zaoblení ostří.....	26
4.2 Vliv poloměru zaoblení ostří na řezné síly.....	28
4.2.1 Závislost řezných sil na poloměru zaoblení ostří.....	28
4.2.2 Minimální hloubka řezu ap.....	29
4.2.3 Porovnání řezných sil s ohledem na rN a vliv ap.....	31
4.2.3.1 Dokonale ostrý břit.....	31
4.2.3.2 Vliv hloubky řezu na řezné síly.....	32
4.3 Vliv poloměru zaoblení ostří na výsledný povrch.....	34
4.3.1 Vlivy geometrie nástroje na výsledný povrch.....	34
4.3.2 Vliv poloměru zaoblení ostří na výsledný povrch.....	34
5 Shrnutí teoretických poznatků.....	37
6 Experimentální část.....	38
6.1 Charakteristika experimentu.....	38
6.2 Materiál.....	39
6.3 Nástroj.....	40
6.4 Experimentální zařízení.....	40
6.4.1 Strojní vybavení.....	40
6.4.2 Zařízení na měření řezných sil.....	41
6.4.3 Zařízení na měření výsledného povrchu.....	41

6.4.4	Zařízení na měření opotřebení nástroje .....	42
7	Pre-experiment .....	42
7.1	Určení vhodné řezné rychlosti pro experiment.....	43
8	Experiment .....	44
9	Zpracování a hodnocení naměřených dat.....	45
9.1	Hodnocení opotřebení nástroje.....	45
9.2	Hodnocení drsnosti obrobeného povrchu .....	49
9.3	Hodnocení řezných sil .....	51
9.4	Hodnocení efektivního řezného výkonu.....	52
9.5	Souhrnné hodnocení .....	53
9.5.1	Vliv opotřebení nástroje na průběh drsnosti obrobeného povrchu .....	53
9.5.2	Závislost poloměru zaoblení ostří a hloubky řezu na průběh řezného procesu .	56
10	Diskuse výsledků.....	57
11	Závěr.....	60
12	Zdroje .....	61



## Seznam použitých symbolů

SYMBOL	VÝZNAM	JEDNOTKA
$\alpha$	úhel hřbetu	°
$\beta$	úhel břitu	°
$\gamma$	úhel čela	°
$\kappa_r$	úhel nastavení ostří	°
A	tažnost materiálu	%
$a_e$	šířka řezu	mm
$a_p$	hloubka řezu	mm
°C	stupeň celsia	°C
F	celkové zatížení nástroje	N
$F_x$	složka řezné síly ve směru X	N
$F_y$	složka řezné síly ve směru Y	N
$F_z$	složka řezné síly ve směru Z	N
$f_z$	posuv na zub	mm
HV	tvrdost podle Vickerse	kgF/mm <sup>2</sup>
$r_N ; \rho_r$	poloměr zaoblení ostří	μm
Rm	mez pevnosti	MPa
Rp0,2	mez kluzu	MPa
T	trvanlivost	min
t	čas	min, s
Ra, Rz, Rt, ....	parametr drsnosti obrobeneho povrchu	μm
V	objem odebraného materiálu	cm <sup>3</sup>
VB	velikost opotřebení nástroje na hřbetě	μm
VBmax	maximální hodnota opotřebení nástroje na hřbetě	μm
$v_c$	řezná rychlost	m/min
$v_f$	posuvová rychlost	mm/min
Z	zúžení materiálu ( kontrakce )	%

## Seznam použitých zkratek

ZKRATKA	POPIS
Al	hliník
C	uhlík
Cr	chrom
ČSN	Česká státní norma
DIN	Deutsches Institut für Normung ( německý ústav pro prům. normalizaci )
FM oceli	feriticko–martenzitické oceli
Mo	molybden
N	dusík
Nb	niob
Ni	nikl
S	síra
Si	křemík
VM	objemový podíl martenzitu
WG	wiper geometrie

# 1 Úvod

Vývoj technické vymoženosti dnešní doby letí nezadržitelně kupředu, sumárně se dá říci, že každým dnem se na světě objeví nový výrobek. Ať už se jedná o vylepšování předchozího modelu nebo vývoj úplné novinky, vždy narůstá potřeba inovace materiálu. Tento trend se projevuje ve všech průmyslových odvětvích.

Podíváme-li se blíže na energetický průmysl, tak první zdání a většinou i názor populace je, že všechny principy a zařízení se nemění již po několik let. Tato domněnka je ovšem mylná! Ač se to na venek nezdá i energetický průmysl se rozvíjí vysokým tempem. Inovace se většinou týkají zvyšování energetické účinnosti, popřípadě dopadu výroby energie na životní prostředí. Zmíněné zvyšování energetické účinnosti můžeme dosahovat novými principy v energetickém průmyslu, ale problém je, že zavedení nějaké zásadní inovace v tomto odvětví představuje obrovskou finanční zátěž. Proto se právě v tomto odvětví využívá pro zvýšení účinnosti zvyšování pracovních podmínek médií. Jako například teploty, tlaku. Často jsou tyto podmínky v teoretických případech posunuty až za hranice současně používaných materiálů.

To sebou přináší vývoj a zkoumání nových konstrukčních materiálů, které by byly schopny odolávat takto nastaveným podmínkám. Prioritou nových konstrukčních materiálů v tomto odvětví je práce s vysokou teplotou a tlakem. Materiál, který se jeví jako nejvhodnější pro využití v těchto podmínkách, je feriticko-martenzitická ocel. Porovnáme-li jí například s austenitickou ocelí, jsou její výhody značné. Mezi přednosti patří především výrazně lepší odolnost proti koroznímu praskání, vyšší tepelná vodivost a nižší koeficient tepelné roztažnosti.

Jak tomu pravidelně bývá, každý objev sebou přináší i jistá úskalí. V tomto případě je onou problémovou částí zpracování takového materiálu. Dosažení vlastností, schopných odolávat náročným podmínkám, je podmíněno vysokým obsahem legujících prvků. Ty se pak nepříznivě projevují při zpracování takového materiálu, zvláště pak pokud se jedná o obrobiteľnost. Náročnost odvětví energetického průmyslu vyžaduje vysokou přesnost obrábění a vysokou kvalitu obrobeného povrchu.

Vývoj materiálu dal vzniknout další problematice a další neznámé pro využití feriticko-martenzitické oceli v energetickém průmyslu. Touto problematikou je právě obrábění takového materiálu a s tím související nároky na stroje a nástroje pro obrábění FM ocelí. Nutností bude provést analýzu procesu obrábění, zejména pak samotného řezného procesu. Vyhodnotit zde veličiny, které zásadním způsobem ovlivňují tento proces a následně vyhodnotit jevy, které se společně s touto problematikou objeví.

## 2 Rozbor materiálu

Moderní používané materiály jsou obvykle hůře obrobitelné, než materiály osvědčené a již dlouhou dobu používané. Označení „hůře obrobitelný materiál“ neznamená, že je materiál špatně obrobitelný nebo, že pro něj nejsou vyvinuty adekvátní nástroje. Problém bývá většinou v neznalosti materiálu, v použití neefektivních rezných podmínek a v neposlední řadě volenou geometrií nástroje. Z těchto poznatků vyplývá, že je důležitá podrobná analýza obráběného materiálu před počáteční rozvahou o obrábění.

Obecně výraz korozivzdorná ocel je výraz pro oceli odolné korozi. U těchto ocelí nacházíme z pravidla vyšší procento chromu Cr (minimálně 12%). Porovnáním s nelegovanými oceli vykazují tyto oceli výrazně lepší korozivzdorné vlastnosti. Mimo vyššího obsahu Cr je korozivzdornost podpořena ještě dalšími legujícími prvky. Například niklem (Ni) nebo molybdenem (Mo). Dále se tyto oceli dolegovávají, ať už za účelem ještě vyšší odolnosti proti korozi (např. niobem a titanem – pro zvýšení odolnosti mezikrystalové korozi) nebo dalšími prvky dle druhu použití (např. dusík – pevnost a vyšší korozní odolnost nebo síra – lepší obrobitelnost). [1], [2]

### 2.1 Typy korozivzdorných ocelí

#### 2.1.1 Feritické oceli

Feritické oceli obsahují 13 - 30 % Cr a s obsahem uhlíku zpravidla pod 0,1 % nejsou kalitelné. Pevnost těchto ocelí je vyšší než u nelegované uhlíkové oceli. Vhodnost použití je především s ohledem k jejich odolnosti proti koroznímu praskání. Nevýhodou je náchylnost ke křehnutí za vysokých teplot (nad 900 °C), které negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti. Oblast rozsahu Cr v těchto ocelí lze rozdělit na 3 základní skupiny:

**a)** 13% chromové feritické oceli, které jsou legovány 11,5 - 15 % Cr a jejichž obsah uhlíku je pod 0,08 %. Tyto oceli mají dobrou korozní odolnost v atmosféře, v přírodní vodě a vodní páře. Dále vykazují dobrou odolnost ve zředěné kyselině dusičné a slabých organických kyselinách.

Jejich využití je nevhodné pro silně znečištěné průmyslové vody, mořskou vodu a silně znečištěné průmyslové atmosféry. Využití nalezneme pro zařízení v chemickém průmyslu (např. sedla ventilů, potrubí čerpadel, výměňkové trubky v zařízeních na zpracování ropy). Nebo v potravinářském průmyslu.

**b)** 17% chromové feritické oceli s rozmezím Cr 16 - 18 % a s obsahem uhlíku pod 0,08 %. Ty mohou být dále legované Mo a případně stabilizované Ti. V některých případech, u vyššího obsahu uhlíku, po ohřevu na teplotu nad 900 °C, dochází k částečné austenitické přeměně a struktura po tepelném zpracování je smíšená - tyto oceli pak označujeme jako poloferitické.

Tyto chromové feritické oceli jsou pak korozně odolné především proti atmosférické korozi, říční a mořské vodě. A odolnost proti kyselinám vykazují hlavně proti kyselině dusičné, zředěným organickým kyselinám a roztokům solí. Oproti chromovým ocelím (13%) mají dobrou odolnost proti znečištěné průmyslové atmosféře a průmyslovým vodám. Dále pak mají dobrou odolnost proti bodové korozi a koroznímu praskání v neutrálních nebo jen mírně kyselých roztocích za přítomnosti chloridových iontů. Při stabilizaci titanem se zlepšuje odolnost proti mezikrystalové korozi.

17% chromové oceli mají dobrou odolnost proti alkalickým prostředím za tepla, benzínu, studeným olejům, chladicím kapalinám bez chloridů a řadě pracích prostředků. Jejich uplatnění nalezneme především v potravinářském průmyslu (zpracování mléka, výroba piva, octa apod.) nebo v automobilovém průmyslu.

c) Třetí skupinu pak utvoří oceli s nejvyšším obsahem Cr (okolo 25%) a s různým obsahem uhlíku. Vysoký obsah Cr zajišťuje ještě vyšší korozní odolnost oproti skupinám 13% a 17% Cr ocelí, ale současně narůstá riziko křehnutí. Hlavní význam pak mají tyto chromové oceli s obsahem uhlíku 0,1 - 0,2 %. Používají se jako žáruvzdorné oceli.

### 2.1.2 Martenzitické oceli

Oceli s obsahem 12-18% Cr a s obsahem C od 0,1% mluvíme o ocelích, které jsou při vysokých teplotách plně austenitické. Prudkým ochlazením z austenitické oblasti, tedy zakalením, získávají tyto oceli martenzitickou strukturu. Austenitizační teploty se nacházejí (v závislosti na druhu oceli) mezi 950 a 1050 °C. Vytvrzování však může probíhat pomaleji, než u nelegovaných ocelí podobného typu (např. ochlazování na vzduchu). Z tohoto faktu vyplývá, že čím větší bude procento obsahu uhlíku C, tím větší bude tvrdost těchto ocelí. Zušlechťený stav těchto ocelí vykazuje vysokou hodnotu pevnosti. U martenzitických ocelí dolegovaných niklem Ni se role uhlíku ujímá právě nikl (např. DIN 1.4313). Zachování schopnosti zakalení oceli, ale aniž by se projevil nepříznivé účinky zvýšeného obsahu uhlíku (jako například vylučování karbidů nebo vysoký nárůst tvrdosti).

Dalším prospěšným legujícím prvkem, který přispívá především k vyšší odolnosti proti korozi, je molybden. Pro tepelné zpracování těchto ocelí je velice důležitý rozměr dodávaného polotovaru, aby bylo možné dosáhnout celkové martenzitické struktury. V závislosti na tvaru takového polotovaru se martenzitické oceli dodávají v žíhaném nebo zušlechťeném stavu. Výrobky, které jsou dodávány ve stavu žíhaném na měkko (např. za studena a za tepla válcovaný pás), mohou být zpracovávány tvářením za tepla nebo za studena (např. ohýbáním, ražením, lisováním, tažením apod.).

Zušlechťování zahrnuje kalení a navazující popouštění na teploty 650-750 °C. Popouštěním se zvyšuje tažnost a snižuje pevnost. S ohledem na lepší odolnost proti korozi se doporučuje přesné dodržování zadaných teplot pro tepelné zpracování. Dalším předpokladem pro dosažení dostatečné korozní odolnosti je vhodná úprava povrchu materiálu. Toho se dosáhne například následným mořením nebo jemným broušením a leštěním.

Oceli tohoto typu se používají například na výrobu nožů v potravinářském průmyslu a v chirurgii nebo na otěruvzdorné součásti, které pracují v agresivních prostředích. Zvyšováním obsahu Cr a zvyšováním uhlíku na cca 1 % se dosáhne zlepšení korozní odolnosti. Ocel je pak určena pro výrobu konstrukčních dílů se zaměřením na chemický průmysl s vysokými nároky na otěruvzdornost při vysoké korozní odolnosti. Nevýhodou těchto ocelí je, že s obsahem uhlíku nad 0,2 % nejsou svařitelné. [1], [9], [11]

### 2.1.3 Austenitické oceli

Austenitické oceli s obsahem 8% niklu mají velkou výhodu. Nabízí totiž velice příznivou kombinaci relativně snadného zpracování, dobrých mechanických vlastností a odolnosti proti korozi. Proto je tato ocel vhodná pro velké spektrum použití a tím jsou nejvýznamnější skupinou korozivzdorných ocelí. Zásadní, a u korozivzdorných ocelí nezbytnou vlastností této skupiny ocelí, je vysoká korozní odolnost. Ta se s narůstajícím obsahem legujících prvků zvyšuje. Nejčastějšími legujícími prvky pro zvyšování korozní odolnosti jsou chrom a molybden.

Základní požadavek jak pro feritické, tak austenitické oceli, je dosažení dobrých technologických vlastností, pro které je nezbytná jemnozrnná struktura. Jako finální tepelné zpracování je prováděno rozpouštěcí žhání. A to při teplotách mezi 1000 a 1150°C. Následuje ochlazení ve vodě, popřípadě na vzduchu.

Austenitické oceli, na rozdíl od martenzitických ocelí, nejsou kalitelné. V některých případech mohou být na austenitické oceli kladeny požadavky na vyšší pevnost. Zvýšení meze pevnosti je možné dosahovat například tvářením za studena. Problémem může být, že při tvářením za studena může docházet k doplňkové tvorbě deformačního martenzitu.

Možnou alternativou pro zpevňování těchto ocelí je pomocí dalších legujících prvků. Nejvíce se osvědčilo použití prvků uhlíku a dusíku. Bohužel, přidávání uhlíku již není možné s ohledem na pokles korozivzdorných vlastností. Oproti tomu dolegování dusíkem přináší výhodu zvýšení pevnosti se současným zlepšením i korozní odolnosti. Ve výsledné podobě materiálu se všemi legujícími prvky je možné dosáhnout meze Rp0,2 až na hodnoty převyšující 400 N/mm (DIN 1.4565). Také hodnoty tažení austenitických ocelí jsou téměř dvojnásobné, oproti feritickým ocelím, což vede k dobré tvařitelnosti za studena (schopnost přetahování nebo ohýbání). [1], [9], [11]

### 2.1.4 Dvoufázové (duplexní) korozivzdorné oceli

Progresivní metalurgické postupy moderní doby jsou schopny produkovat modifikované korozivzdorné oceli na bázi sloučení některých druhů o vysoké čistotě, které vyhovují novým a především vyšším požadavkům na korozní odolnost. Využití těchto nových materiálů přináší nejen rozšíření použitelnosti jednotlivých druhů ocelí, ale i posunutí hranic použitelnosti těchto materiálů v agresivních a náročných prostředích. [30]

#### 2.1.4.1 Austeniticko-feritické oceli

Vzhledem ke dvěma složkám struktury austeniticko-feritické oceli se často označují jako duplexní oceli. Jejich použití nabírá stále vyššího významu a stále více se zkoumají její možnosti. Jedním ze zástupců pro duplexní ocel je X2CrNiMoN22-5-3 (mat. čís. DIN 1.4462). Tato ocel obsahuje asi 22 % Cr, ca. 5 % Ni, ca. 3 % Mo a dusík. Tím je dosaženo austeniticko-feritické struktury (zpravidla 50:50). Je zřejmé, že mez tažnosti je výrazně vyšší než u austenitických ocelí. Při tom jsou zachované dobré hodnoty houževnatosti. Je nutné zdůraznit i dobrou únavovou pevnost oceli, a to i v korozivních médiích. Pozorování korozní odolnosti austeniticko-feritických korozivzdorných ocelí ukázalo, v porovnání s austenitickými oceli, lepší odolnost proti napěťové korozi vyvolávané chloridy.

Také svařitelnost austeniticko-feritických ocelí je za respektování předpisů pro postup svařování bez větších problémů. Celkový dobrý profil vlastností nabízí široké spektrum

využití s hlavním těžištěm pro výrobu zařízení pro chemický průmysl a v technice, která je během provozu vystavována agresivnímu mořskému prostředí. [1], [9], [11]

#### 2.1.4.2 Martenziticko-austenitické oceli

Martenziticko-austenitické oceli obsahují cca 0,06 % C, 13 -16 % Cr, 4 - 6 % Ni a max. 2 % Mo. Struktura je tvořena martenzitem a přibližně 25 % austenitu. Pro vyšší obsah Cr a Mo se může objevit i delta ferit. Oceli se vyznačují vysokou pevností, dobrou tažností, svařitelností, odolností proti křehkému lomu a proti kavitaci. Korozní odolnost je zřetelná z chemického složení. Například ocel typu CrNi13-2 má korozní odolnost odpovídající 13% chromovým ocelím, typ CrNiMo 13-6-1 odpovídá 17% Cr ocelím. Používají se na oběžná kola vodních turbín, v parních elektrárnách, na armatury a čerpadla v chemickém průmyslu. [30]

#### 2.1.4.3 Feriticko-martenzitické oceli

Mezi feriticko-martenzitické oceli patří ocel s 13 % Cr a velmi nízkým obsahem C (max. 0,04 %), nízký obsah S a P (0,008 %), oproti tomu zvýšený obsah Mn (1,5 %) a jsou zde použity Ti nebo Nb jako stabilizační prvky. Vyšší obsah Mn zajišťuje zvýšení hodnoty pevnosti a stabilizace Nb (Ti) přispívá ke zjemnění zrna a zlepšuje vrubovou houževnatost. Struktura je tvořena asi 20 % feritu, zbytek je martenzit a karbidy. V porovnání s feritickými 13% ocelmi je patrná vyšší korozní odolnost. Tato ocel je používána hlavně pro vodné roztoky obsahující CO<sub>2</sub>, jako jsou kyselé vody při těžbě zemního plynu obsahující chloridy. Zlepšená tvařitelnost v širokém rozsahu teplot umožňuje vyrábět i trubky válcované za tepla. Současně se zlepšuje i svařitelnost oceli. [30]

#### 2.1.5 Precipitačně vytvrditelné korozivzdorné oceli

Největší výhodou, kterou se vyznačují precipitačně vytvrditelné korozivzdorné oceli je jejich možnost obrábění v měkkém stavu. Konečný výrobek z tohoto materiálu se pak vytvrzuje popouštěním za poměrně nízkých teplot. Nedochozí zde k deformacím oceli a ani k oxidaci povrchu. Martenzitické precipitačně vytvrditelné oceli se dále mohou rozdělit podle jejich chemického složení. A to na oceli s přímou a nepřímou martenzitickou přeměnou. Obecně lze pro všechny typy precipitačně vytvrditelných ocelí charakterizovat navazující pochody:

- rozpouštěcí žíhání při 1025 °C a jejich prudké ochlazení na teplotu, aby proběhla martenzitická přeměna
- precipitační vytvrzování při teplotách 400 - 700 °C v závislosti na chemickém složení

Oceli s přímou martenzitickou přeměnou jsou např. X12CrNiTi 17-7 nebo X10CrNiCuTi 17-4-4, obě s 1 % Ti. Při vytvrzování (400 - 500 °C) precipitují fáze Ni<sub>3</sub>Ti a Ni<sub>3</sub>Cu a dosahují meze pevnosti 1300 - 1500 MPa. Používají se hlavně v letectví, kosmonautice, lodním průmyslu, při zpracování polymerů aj. Do této skupiny je možné zařadit i vytvrditelné martenziticko-austenitické oceli typu 3CrNiMoTiAl 6-11-3 nebo 3CrNiMoTiAl 10-10-3, vyznačují se především vysokou mezí kluzu ve vytvrzeném stavu (1400 - 1600 MPa), dobrou plasticitou a odolností proti korozi. Využívají se například pro hodně namáhané části v jaderné energetice nebo pro lopatky parních turbín. Příkladem ocelí s nepřímou martenzitickou přeměnou jsou například X8CrNiMoAl, 15-7-2,5 nebo X10CrNiAl 17-7.

Austenitické precipitačně vytvrditelné oceli se vysokých pevnostních hodnot dosahuje precipitací karbidů a nitridů z austenitické struktury oceli typu CrMnVN 16-20-1,3 nebo precipitací dalších intermetalických fází Ti a Al doprovázející precipitaci karbidů u oceli typu 10CrNiMoTiAlV 15-25. Tyto oceli se používají nejvíce pro vysoce namáhané součásti, jako : tryskové motory, turbínová kola, ventilátory, zařízení v petrochemickém průmyslu a zařízení pro nízké teploty. Korozní odolnost je srovnatelná se standardními korozivzdornými ocellemi. [30]

## 2.2 Charakteristika struktury feriticko-martenzitických ocelí

Jedná se o materiály s nižším obsahem uhlíku (maximálně 0,13% uhlíku), které jsou založeny na bázi Mn – Si, popřípadě doplněné další legující prvky (např. molybden, chrom, vanad). Ke zpevnění feritické matrice přispívají především substitučně mangan a křemík (vyjmečně precipitačně). Dvoufázové feriticko-martenzitické oceli (FM oceli) tvoří skupinu vysoce pevných ocelí pro tváření za studena. Pro charakterizování struktury FM ocelí by se dalo říci, že je tvořena disperzí tvrdé fáze ve feritické matrici. Martenzit zde obvykle vystupuje jako tvrdá, sekundární fáze, není to však podmínkou. Je možné, že se zde objeví i jiné produkty nízkoteplotní transformace popřípadě zbytkový austenit. Struktura FM ocelí obsahuje 75 – 90% polygonálního feritu a 10 – 25% martenzitu homogenně dispergovaného ve formě ostrůvků ve feritické matrici. A právě tyto ostrůvky martenzitu mohou obsahovat určitý podíl zbytkového austenitu. Ten se aktivně podílí na kombinaci pevnostně plastických charakteristik [1]. Tyto vlastnosti materiálu jsou zde způsobeny „měkkou“ feritickou matricí. Ovšem rozhodující parametr, o pevnostní hladině materiálu, je objemový podíl martenzitu.

Vzhledem k častému využití FM ocelí v automobilovém průmyslu, jsou u těchto materiálů v souvislosti s efektivitou práce kladeny zvláštní požadavky. Které jsou dány jednak smyslem využití, ale i způsobem zpracování. Pro tyto účely jsou sledovány tyto vlastnosti:

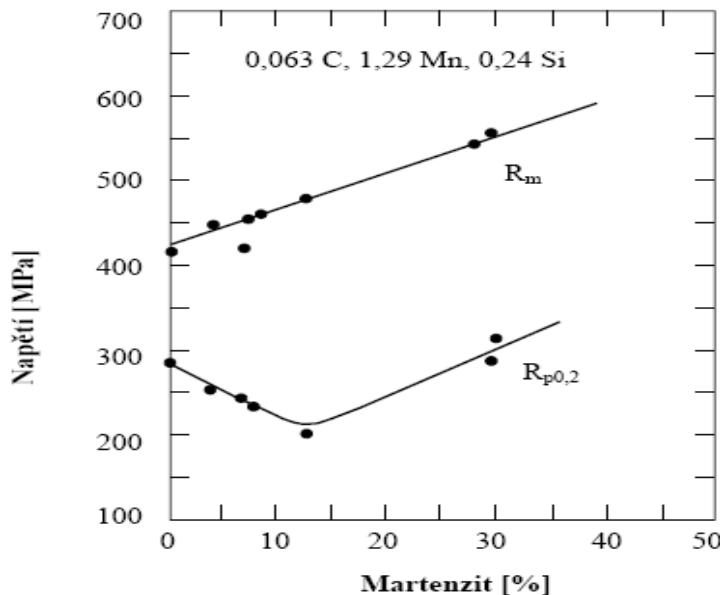
- Plynulá závislost napětí (tedy deformace bez výrazné meze kluzu).
- Požadavek na nízkou hodnotu meze kluzu a vysokou hodnotu meze pevnosti. Nízký poměr  $R_{p0,2} / R_m (< 0,65)$
- Vysoké hodnoty homogenního, ale i celkového prodloužení
- Vysoké hodnoty koeficientů deformačního zpevnění
- Zvýšená odolnost vůči stárnutí za pokojových teplot
- Co možná největší zvýšení meze kluzu za účelem zpevnění při vypalování laků

Tyto kritéria mechanických vlastností feriticko-martenzitických ocelí jsou ovlivněny jednak přítomností martenzitu (ten zajišťuje vysokou mez pevnosti), ale i objemovými změnami v průběhu martenzitické transformace. Jak již bylo řečeno, objemový podíl martenzitu ve struktuře je zásadní parametr pro pevnostní hladinu materiálu. Čím je větší objemový podíl martenzitu VM, tím je vyšší mez pevnosti materiálu  $R_m$ . Tuto závislost objemového podílu na mezi pevnosti lze vyjádřit empirickým vzorcem :

$$R_m = 480 + 9,1VM \quad [2]$$



Vzhledem k důležitosti meze pevnosti materiálu pro jeho použití je patrné, že hodnotu objemového podílu martenzitu je nezbytné sledovat a přísně kontrolovat! Má totiž přímou vazbu na stabilitu meze pevnosti. Objemová změna, která doprovází martenzitickou transformaci, je dána absolutní hodnotou teploty  $M_s$ , resp. chemickým složením austenitu, který má vliv na hodnotu této teploty. Tato objemová změna zapříčiní, že okolní feritická matrice se deformuje, tím vytváří vnitřní pnutí a tím se aktivují dislokační zdroje a skluzové roviny. To má pak za následek zvýšení hustoty pohyblivých dislokací. Právě tento jev pak

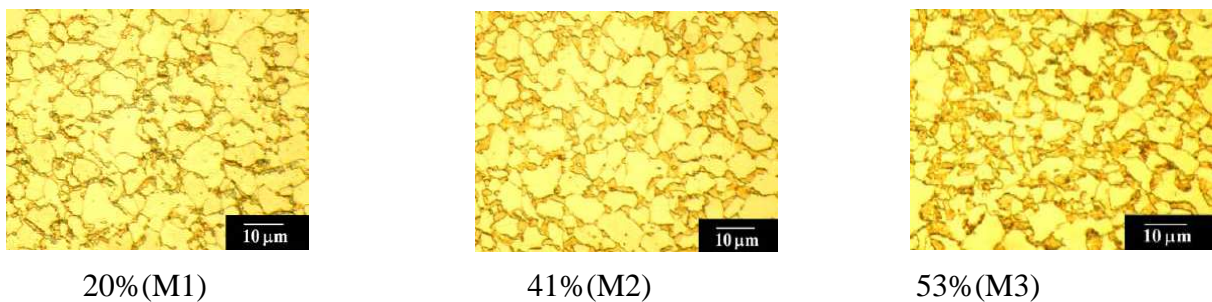


sebou přináší, při optimálním a konstantním podílu fází, snížení meze kluzu a plynulý průběh křivky závislosti napětí na deformaci. Mez kluzu, která je ovlivněná nárůstem objemového podílu martenzitu, klesá a dále pak kontinuálně roste. To je patrné na vyobrazeném grafu (viz obrázek 2). Ten vyjadřuje závislosti meze pevnosti a meze kluzu na objemovém podílu martenzitu VM u feriticko-martenzitických ocelí. [2]

**Obr. 1.** Závislost meze pevnosti a meze kluzu na objemovém podílu martenzitu v FM oceli. [2]

Dojde-li k nárůstu objemového podílu martenzitu nad 30%, vznikne zde vysoké riziko shlukování martenzitických ostrůvků, popřípadě nebezpečí vzniku spojitě martenzitické fáze! Tento jev by pak měl negativní vliv na výhodné vlastnosti těchto ocelí – kombinaci pevnostních a plastických charakteristik – tedy na tvárnosti materiálu.

Ukázka změny struktury s nárůstem objemového podílu martenzitu:



**Obr. 2.** Struktura FM ocelí v závislosti na objemovém podílu martenzitu [2]

## 2.3 Chemické složení

- Přehled zastoupení jednotlivých prvků u FM ocelí

Označení	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	W	WNr.	Zkratka
42 2905	max. 0,15	0,30 0,70	0,30 0,70	12,00 14,00	max. 1,00				1.4006	G-X10Cr13
42 2906	0,15 0,30	max. 0,70	max. 0,70	12,00 14,00	max. 1,00				1.4027	G-X20Cr14
42 2907	0,30 0,40	0,40 0,90	0,30 0,70	12,00 14,00					1.4028	X30Cr13
1.4122	0,33 0,43	max. 1,00	max. 1,00	15,50 17,50	max. 1,00	0,90 1,30			1.4122	G-X35CrMo17
17 042	0,90 1,05	max. 0,90	max. 0,70	16,00 18,00						98Cr17

*Obr. 3. Přehled chemického složení FM ocelí - Kdynium [3]*

Každý materiál je specifický svým chemickým složením. Toto složení pak vystupuje v pojmenování materiálu nebo je materiál označen obchodním názvem a jeho chemické složení je specifikováno jako doplňující informace.

Tento příklad je možné demonstrovat na oceli P91, protože právě složení a celkové poznání této oceli je důležité pro následující části.

Označení ocel P91 je pouze obchodní název, který o chemickém složení moc nevyovídá. Jedná se o dvoufázovou feriticko-martenzitickou ocel typu CrMoVNbN s poměrně nízkým obsahem uhlíku oproti ocelím tohoto charakteru. Z uvedeného chemického složení již vyplývá, že u této oceli se bude vyskytovat martenzitická struktura v širokém rozsahu ochlazovacích rychlostí s tvrdostí do 420 HV (200 HB). Tato ocel na trhu zaplňuje prostor mezi nízkolegovanými oceli typu CrMo (CrMoV) a austenitickými korozivzdornými oceli. [7]

- Chemické složení oceli P91

Prvek	Rozsah výskytu prvku [%]
C	0,1 - 0,14
Cr	8 - 9,5
Mo	0,85 - 1,05
Mn	0,3 - 0,6
V	0,18 - 0,25
Nb	0,06 - 0,1
Si	0,2 - 0,5
Ni	0 - 0,4
N	0,03 - 0,07
Al	0 - 0,02
P	0 - 0,02
S	0 - 0,01

*Obr. 4. Chemické složení feriticko-martenzitické oceli EN ISO X12CrMoVNbN9-1 [17]*

Oproti nízkolegovaným ocelím je ocel P91 doplněna legujícími prvky vanadem, niobem a dusíkem. Prvky V a Nb jsou silně karbidotvorné a zvláště pak s uhlíkem a dusíkem tvoří karbonitridy, které jsou pak jemně dispergované po celém objemu materiálu. Karbonitridy v materiálu zajišťují vysokou stálost i za maximálních provozních teplot a zaručují vysokou odolnost proti creepu.

## 2.4 Vliv legujících prvků

### Chrom

Používá se jako velmi častá přísada a v materiálu jej obvykle nalezneme již od počátků vývoje legovaných ocelí. První pokusy se objevili při přidávání chromu do molybdenových ocelí. Zde se od chromu očekávalo, že vylepší korozní odolnost, zvýší plasticitu proti porušení při tečení a potlačí sklon ke grafitizaci.

Pro klasické chromové oceli, u kterých se vyskytuje vysoký podíl chromu, se pak očekává především zajištění vysoké žáruvzdornosti a to až do teplot dosahující k 600°C. Chrom je jeden z nejdůležitějších prvků v korozivzdorných ocelích. Zajišťuje tzv. pasivaci ocelí a následnou oxidační odolnost. Korozní odolnost v oxidačních prostředích roste se zvyšujícím se obsahem chromu. [7], [10]

### Molybden

Uvažujeme-li o zvyšování žáruvzdornosti, pak společně s chromem většinou nechybí ani molybden. Molybden má přímý vliv na typ a morfologii karbidické fáze. Rozpouští se především ve feritu, což vede u těchto materiálů ke zvýšení žáruvzdornosti. Například u CrV ocelí se molybden kladně projevuje při obsahu do 1%. Vyloučení speciálního rovnovážného karbidu  $M_6C$  předchází precipitace karbidu  $M_2C$ . U toho se vyskytuje jehličkovitý tvar a rovněž se vyskytuje v jemné disperzi. Při udržení nízkého poměru vanadu ku uhlíku se kladně projeví nárůst žárupevnosti (např. u CrMoV ocelí). [7]

### Vanad

Vyskytuje se ve formě karbidu vanadu ( $V_4C_3$ ). Jeho značná aktivační energie difúze vanadu vede k vylučování tohoto karbidu v podobě jemné disperzní formy. Pomalým hrubnutím se velice efektivně zvyšuje žárupevnost feritických ocelí. V kombinaci u chromových ocelí se vanad rozpouští při nižších koncentracích, tím může tvořit karbonitrid, který se distribučně i morfologicky podobá karbidu  $V_4C_3$ . [7]

### Niob

Niob při porovnání vlastností, které ovlivňují legovaný materiál, má podobné dopady jako vanad. Jeho vysoká afinita k uhlíku a vyšší bod tání karbidu niobu má na legovanou ocel dopad v podobě vyšší stability karbidické fáze. Velmi zřídka se používá legování pouze niobem, většinou je legování tímto prvkem podpořeno legováním právě vanadem. Precipitace karbidu vanadu je snížena nedokonalostí rozpouštění karbidu niobu, vzniklých při krystalizaci z taveniny. U chromových ocelí je niob další z řady prvků, který podporuje zvyšování žárupevnosti. [7]

### Dusík

Dusík je prvkem, který výrazně zvyšuje pevnostní hodnoty. Jeho přítomnost v materiálu je velmi dobrým předpokladem pro tvorbu austenitu. Společně s molybdenem zvyšuje odolnost proti korozím - bodové a štěrbinové. [10]

## Další legující prvky FM ocelí

- **Nikl** zlepšuje odolnost vůči korozi v redukčních kyselinách, za normálních teplot pomáhá stabilizovat austenit [10]
- **Mangan** v některých případech je používán jako náhrada za dražší nikl, protože je také austenitotvorný. Mangan však zhoršuje obrobiteľnosť. V případě, že koncentrace přesahuje 3%, snižuje náchylnost k praskání svarů. [10]
- **Křemík** při koncentraci 3 - 4% je užitečný pro snížení rizika mezikrystalické koroze a zároveň zvyšuje odolnost vůči korozi ve vroucí kyselině dusičné. Nevýhodou křemíku je, že vyvolává sklon k praskání svarů. [10]
- **Měď** je také austenitotvorný prvek, ale jen v menším rozsahu. Prioritně zvyšuje korozní odolnost v prostředích kyseliny sírové a zlepšuje podmínky pro obrobiteľnosť. Využívá se k legování vytvrditelných ocelí. [10]

## 2.5 Mechanické vlastnosti FM ocelí v závislosti na teplotě

Teplota oceli [°C]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	Tažnost A [%]	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

Obr. 5. Mechanické vlastnosti feriticko-martenzitické korozivzdorné oceli P91 v závislosti na teplotě [17]

## 2.6 Doporučení pro obrábění korozivzdorných ocelí

Obrobiteľnosť korozivzdorných ocelí je nejvíce ovlivněna vysokou houževnatostí těchto materiálů a poměrně vysokou pevností v tahu. Tyto vlastnosti vedou nejčastěji k tomu, že při obrábění se vyskytuje nárůstek na nástroji. Nárůstek obecně vzniká při nižších posuvech. Na nástroj pak působí tříska větším tlakem a v místě dotyku dochází k takzvanému navařování.

Pro zlepšení obrobiteľnosti výrazně přispívá síran manganu. Jeho výskytu v materiálu předchází přidání síry do oceli. Dosáhne se tak lepší lámavosti třísky. Ale jako vedlejší produkt tohoto zlepšení obrobiteľnosti se objevuje snížená odolnost proti korozi, zejména proti důlkové korozi. Další vlastnosti vyvolané přítomností síry jsou snížená tažnost a obtížnější svařitelnost, což výrazně ovlivňuje použití takto dolegovaných materiálů.

Vlivem těchto okolností se tak pro zamezení nárůstku používá spíše změna řezných podmínek. Například obrábění vysokými posuvy a nižší řeznou rychlostí. Dále je vhodné používat geometrii nástroje s utvářeči třísky.

Existují také doporučená rozmezí řezných rychlostí pro obrábění korozivzdorné oceli, ve kterých se tvorba nárůstku nevyskytuje. Například u feriticko-martenzitické oceli jsou doporučené rozmezí řezných rychlostí  $v_c = 40 - 90$  a pak  $180 - 400$  m/min.

Mezi dalšími poznatky vedoucí k lepší obrobitelnosti korozivzdorných ocelí je doporučení o využití sousledného frézování. V případě nesousledného frézování byly zaznamenány dlouhé doby kontaktu nástroje se zpevněnou vrstvou, což vede k dalšímu deformačnímu zpevňování a nárůstu řezných sil. Právě z důvodu zpevnění vrstvy a tzv. hlazení se doporučují pro obrábění korozivzdorných ocelí stroje s vysokou tuhostí a to jak stroje, tak i samotného upnutí nástroje a obrobku. Dalším požadavkem je adekvátní výkon stroje (ten by při obrábění neměl být zatížen na maximum), měl by být schopen udržovat stále otáčky a plynulý posuv.

Zaměříme-li se na nástroj, pak je důležité zmínit vhodnou volbu poloměru zaoblení ostří. Velký poloměr zaoblení ostří  $r_N$  sebou přináší vyšší trvanlivost břitu, ale také se při jeho použití objevuje zvýšený výskyt vibrací. Malý poloměr zaoblení ostří má pozitivní vliv na snížení řezných sil, ale negativně se projeví na trvanlivosti nástroje (zalomení břitu). Je důležité najít optimální nastavení (velikost poloměru zaoblení ostří), které zastupuje maximální možnou ostrost nástroje a optimální trvanlivost.

Důležitým parametrem ostří je v tomto případě i utvářeč třísky, který má za úkol nejen snižovat riziko nárůstku, ale má také zabránit návratu třísek do místa řezu.

### 3 Geometrie nástroje

Volba geometrie a vůbec volba řezného nástroje je velice důležitý krok před přistoupením k samotnému obrábění. Nevhodnou volbou vznikají závažné problémy na výsledném produktu – obrobku. Ať už se jedná o problémy s finálním povrchem, nadměrným opotřebením nástroje nebo nevhodné řezné podmínky, vždy se tato volba projeví na ceně obrobku.

#### 3.1 Hladící geometrie wiper

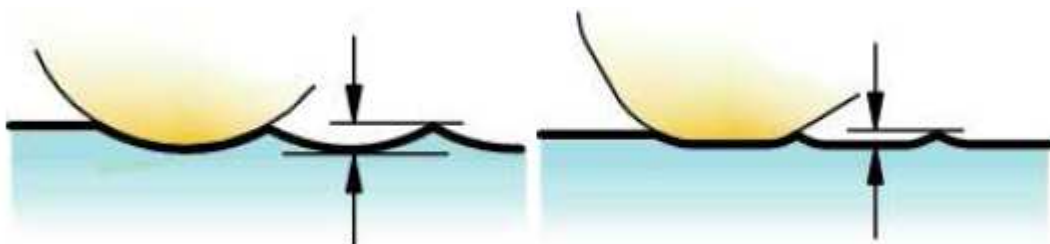
Původní myšlenka nové geometrie byla upravit břit takovým způsobem, aby se zlepšily parametry obrobeného povrchu, za předpokladu zachování řezných podmínek, popřípadě za ještě produktivnějších.

Velice příznivý krok přinesla v polovině osmdesátých let na trh firma Iscar. Jednalo se o koncepci hladící geometrie (hladící – stahovací geometrie břitu), kterou použili na jejich multifunkční Grip nástroje. Tato geometrie velmi výrazně zproduktivnila ekonomický dopad třískového obrábění ve strojírenském průmyslu. Přibližně v roce 1991 byla dále tato geometrie rozšířena na další typy vyměnitelných ISO destiček a souhrnně byla označena jako WG, což znamená Wiper Geometry. V současné době je tato geometrie rozšiřována na další druhy keramických nebo CBN destiček.

Od počátečních aplikací až po současný stav, byly prováděny různé optimalizace a úpravy na různé typy úkonů destiček. Byla optimalizována jak samotná WG geometrie, tak i nové nastavení utvářečů třísek nebo jejich celkový aplikační rozsah. Zmíněné optimalizace sebou přinesly významné zlepšení drsnosti obrobeného povrchu, zlepšení odvodu třísek z místa řezu a jejich lepší utváření. Tyto optimalizace se tak souhrnně zasadily o výrazné zefektivnění výroby a výrazné úspory výrobních nákladů. Zásadního ekonomického efektu je dosaženo zejména tím, že WG geometrie nahrazuje v mnoha případech operaci

dokončovacím broušením. Úspěšná aplikace hladících břitů je pak potvrzena z náročného prostředí automobilového průmyslu, kde je využívána pro dokončování různých hydraulických součástí, případně soustružení či frézování zápustek a šablon.

Zaměříme-li se na konkrétnější případ, pak drsnost obrobeného povrchu touto destičkou je  $R_a = 0,5\mu\text{m}$  (obrábění za sucha, řeznou rychlostí 100 m/min, posuvem 0,2 mm/ot a hloubkou řezu  $a_p = 0,2$  mm). Do konce ani po 16 minutách obrábění nepřevyšuje drsnost obrobeného povrchu hodnotu  $R_a = 1\mu\text{m}$ . Dalšího výrazného zlepšení je možné dosáhnout snížením posuvu na 0,15 mm/ot a to až na hodnotu  $R_a = 0,3\mu\text{m}$ . [19]



Obr. 6. Porovnání povrchů utvářených klasickou a WG hladící geometrií [18]

Při porovnání výsledků dosažených na shodném materiálu, ale bez WG geometrie řezného břitu jsou patrné kvalitativní odchylky, jak je naznačeno na obrázku 6. u obráběných ploch. Levý obrázek naznačuje obrábění břitem bez WG geometrie. Při porovnání obrázků je jasné, kde a jakým způsobem dochází k rozdílu drsnosti obrobeného povrchu. Při porovnání s předchozím uvedeným příkladem se drsnost obrobeného povrchu pohybuje za stejných podmínek okolo  $R_a = 2\mu\text{m}$  a po 16 minutách obrábění dochází ještě ke zhoršení na hodnotu přesahující  $R_a = 2,5\mu\text{m}$ . [19]

### **Koncepce hladící geometrie**

Nejvíce ovlivňující parametry, které mají vliv na konečnou drsnost obrobené plochy, jsou bez pochyb konstrukce nástrojů, geometrie břitu, popřípadě úprava řezného břitu a řezné podmínky. Všechny tyto parametry mají vliv na finální stav obrobku.

Porovnáme-li obecně drsnost obrobeného povrchu po obrábění, kde byla použita standardní ISO destička, pak parametry povrchu (jako  $R_a$ ,  $R_t$ , ...) jsou silně závislé na použitém rádiu, pracovních úhlech a použitých řezných podmínkách. Použitím WG dochází ke snižování závislosti na těchto parametrech, při zachování nebo dokonce zlepšení drsnosti obrobeného povrchu.

Geometrie hladícího břitu je tvořena od radiusu rohu destičky, kde tangenciálně navazuje po obou stranách hladící břit o délce  $L$  pod určitým úhlem. Délka  $L$  pak musí být větší než maximální používaný posuv, tak aby bylo dosaženo dobré drsnosti obrobeného povrchu.

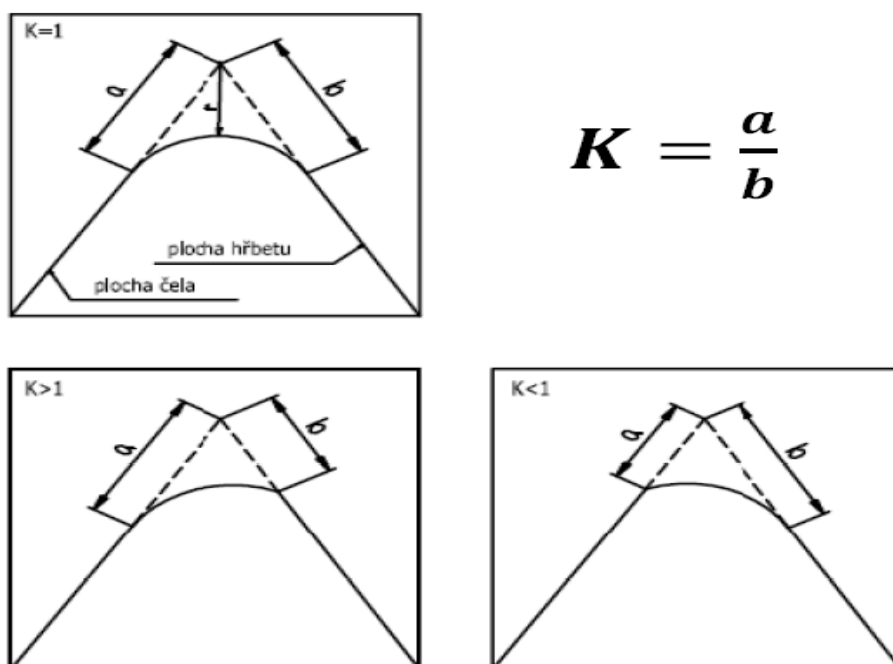
Další významnou částí, která přispívá pro efektivnější obrábění, je doplnění nástroje s hladící geometrií o vhodný utvařecí třísky. Ten zabezpečuje dělení třísky a odchod třísky z místa řezu. Utvařecí třísky zabraňuje, aby se třísky dostávaly zpět do místa řezu, pod břit. Pokud by se třísky hromadily před nástrojem a došlo by k vrácení třísky do místa řezu, tak by mohlo dojít ke zhoršení drsnosti obrobeného povrchu. Další funkcí takového utvařecího je vhodné dělení třísky. Například firma Iscar nabízí dva základní typy utvařecí. První, který je určen pro standardní geometrii WG, ten by měl pokrývat většinu obráběných materiálů. Druhý typ utvařecí je koncipován pro novou geometrii WF, která je zaměřená pro obrábění velmi měkkých uhlíkových ocelí, použitím nízkých hodnot posuvů a malými řeznými hloubkami. [19]

### 3.2 K faktor

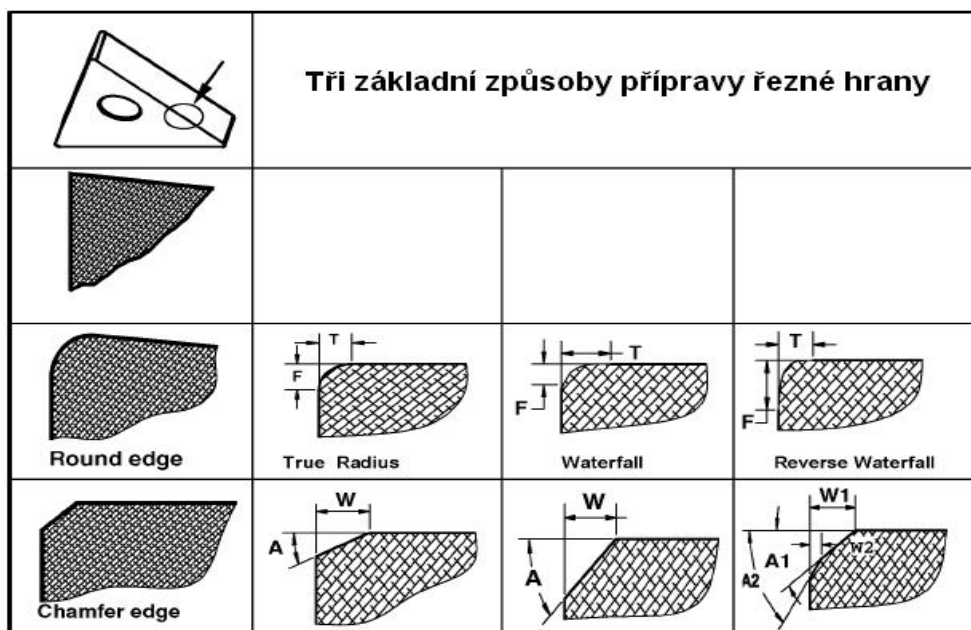
Takzvaný K faktor je ukazatel symetrie profilu břitu řezného nástroje, který popisuje tvar profilu břitu. Jeho velikost je dána poměrem délek dvou tangent prodloužených do teoretické špičky břitu nástroje. Je to velice důležitý faktor, který se používá zejména při měření břitu nástroje. [13]

*Tímto faktorem lze popsat 3 základní stavy, které mohou nastat:*

- a) **K=1** – jedná se o symetrický rádius
- b) **K<1** – jedná se o nesymetrický rádius směrem k ploše čela
- c) **K>1** – jedná se o nesymetrický rádius směrem k ploše hřbetu



Obr. 7. Typy K faktoru [13]



*Obr. 8. Způsoby úpravy řezné hrany [20]*

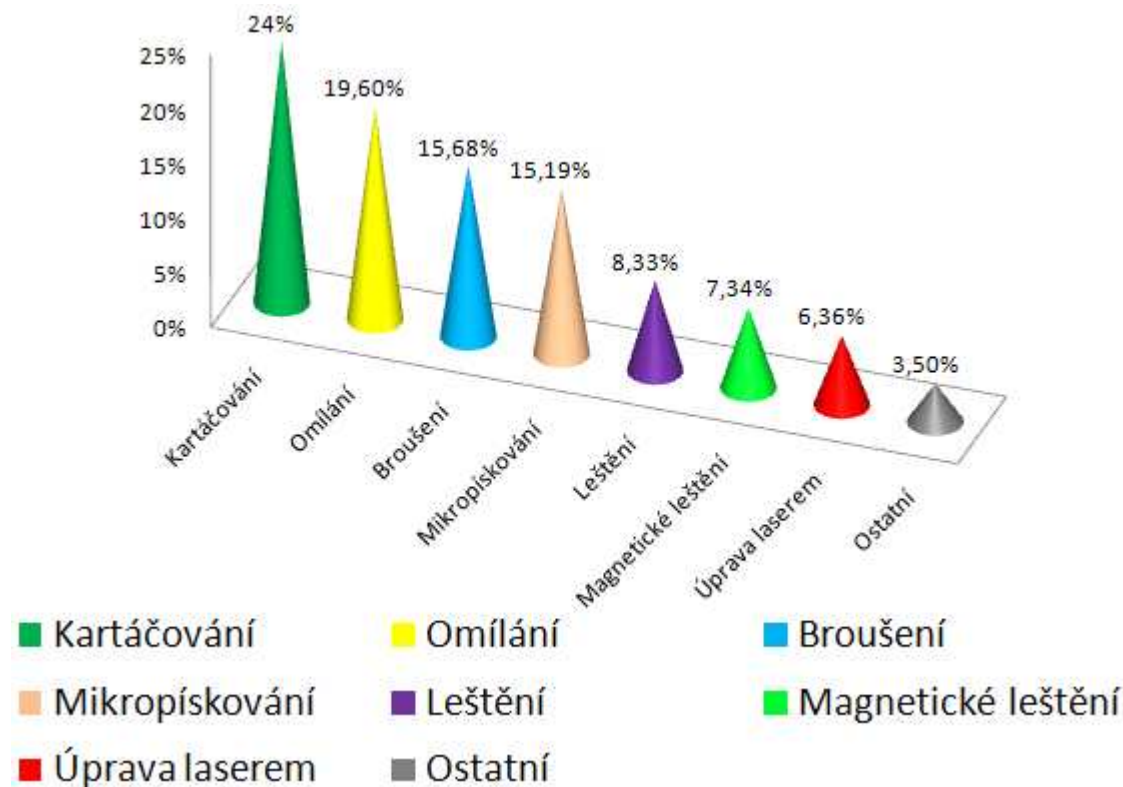
Požadovaný tvar ostří je závislý na několika různých faktorech. Od způsobu výroby nástroje, přes jeho broušení, až po konečné úpravy ostří.

Úprava mikrogeometrie ostří má vliv na následující parametry:

- zvyšuje pevnost břitu
- příprava povrchu před depozicí (lepší přilnavost)
- odstranit otřepy vzniklé broušením
- snížit sklon k vyštipování břitu
- zvýšit životnost nástroje
- vytvoření definovaného tvaru a rozměru ostří
- přispívá ke zlepšení drsnosti obrobeného povrchu obrobků



### 3.3 Úpravy řezné hrany



Obr. 9. Využití metod konečné úpravy ostří [7]

#### 3.3.1 Vlečné omílání

Proces vlečného omílání je kombinací jemného broušení a leštění. Pro nástroje je úprava mikrogeometrie ostří velice přínosná. Zlepšuje stabilizaci břitu, přispívá ke snížení řezných sil a prodlužuje trvanlivost břitu při obrábění.

Pro metodu vlečného omílání jsou obrobky (v tomto případě nástroje) umístěny do speciálních držáků. Dále jsou pak ve vysokých rychlostech vlečeny planetovým pohybem (po elipsách) v nádobě s brusným nebo leštícím médiem. Při tomto pohybu nádobou dochází k tlaku mezi obrobkem a brusným médiem, čímž dochází k abrazivnímu obrábění (omílání). Rozhodujícím parametrem je velikost tlaku, ta je určena rychlostí pohybu v nádobě. [14]

#### 3.3.2 Úprava laserem

Laser je v podstatě zesilování elektromagnetického záření, světla do místa požadovaného úběru materiálu. Hlavní výhodou této technologie je, že je možné soustředit energii na velmi malé plochy bez použití mechanické síly. To umožňuje zpracovávat i velmi křehké materiály malých rozměrů. Paprsek laseru lze přivést i do velmi těžce přístupných míst obrobků (např. pomocí zrcadel nebo optického kabelu). Paprsek laseru je chemicky čistý, a proto je možné obrábět bez znečištění obráběného materiálu. [24]

### 3.3.3 Další používané technologie

#### **Kartáčování:**

Pro úpravu břitu se používají speciální nylonové kartáče, na které jsou ještě naneseny brusiva. Tento způsob je možné použít i pro leštění povrchu funkčních částí nástroje (např. k odstranění mikročástic po povlakování). [15]

#### **Lapování:**

Touto úpravou povrchu je možno dosáhnout maximální přesnosti rozměrů (0,1 až 0,5 $\mu$ m) a to i geometrického tvaru. Velice příznivé jsou i podmínky drsnosti obrobeneho povrchu ( $R_a = 0,01$  až 0,15 $\mu$ m). K úběru materiálu dochází účinkem zrn volně rozptýleného brusiva pod lapovacími kameny. [15]

#### **Pískování:**

Abrazivní zrna, jakožto volné částice jsou v proudu nosného média (vzduchu) usměrňovány na povrch obrobku (nástroje) a napomáhají tak k jeho utváření, čištění. Pískování se používá k mechanickému čištění před povlakováním. Tuto technologii lze použít i pro odstranění nežádoucích otřepů na břitech vzniklých broušením nástroje. Pro tuto technologii je velice důležitá správná volba vhodného abraziva. Volba nevhodného abraziva by mohla povrch nenávratně poškodit. [15]

#### **Iontové čištění:**

Podobně jako při pískování, dochází při iontovém čištění k usměrňování proudu iontů. Ionty při dopadu na substrát vyrážejí mikronečistoty usazené na povrchu. [15]

#### **Čištění ultrazvukem:**

Přináší celou řadu výhod. Velice krátký čas čistícího procesu. Kvalita čištění za předpokladu správně zvoleného media je vynikající. Ultrazvuk je vhodný i pro nepřístupná místa. Stejně dobře vyčistí jak rovinnou plochu, tak i tvarově složitý předmět nebo slepý otvor. [15]

## 4 Vliv poloměru zaoblení ostří na řezný proces

Poloměr zaoblení ostří je jeden ze zásadních parametrů, který ovlivňuje řezný proces. Tento parametr je nutné vhodně volit s ohledem na obráběný materiál, na strojní vybavení a v neposlední řadě na požadovanou trvanlivost nástroje a požadovanou drsnost obrobeného povrchu. Všechny tyto faktory jsou spolu propojeny závislostmi, které je nutné sledovat na konkrétních případech (konkrétních materiálech), protože závislost zjištěná u vybraného typu materiálu se na jiném druhu materiálu může projevit úplně jiným způsobem.

S ohledem na různé změny parametrů geometrie na nástroji je možné vyhodnocovat několik vlivů (výstupů) z řezného procesu. Mezi nejdůležitější a nejčastěji vyhodnocované patří :

- vliv na trvanlivost nástroje
- vliv na řeznou sílu
- vliv na integritu povrchu

Průběžně lze dále sledovat například vzniklé teplo při obrábění nebo vznik vibrací / stabilitu řezu během řezného procesu. Ovšem tyto vlastnosti se negativně projevují v již zmíněných vlivech a řešíme je s ohledem na výstup (např. na drsnost obrobeného povrchu nebo na trvanlivost nástroje / bříty).

Zásadním způsobem je chování řezného procesu ovlivněno stavem řezné hrany nástroje. Zvětšující se opotřebením řezné hrany se začne negativně projevovat ve všech zmíněných bodech.

### 4.1 Vliv poloměru zaoblení ostří na trvanlivost bříty

#### 4.1.1 Vliv geometrie bříty na trvanlivost bříty

Trvanlivost bříty řezného nástroje nejvíce ovlivňuje geometrie. Tím je myšleno úhel nastavení čela ( $\gamma$ ), hřbetu ( $\alpha$ ), hlavního a vedlejšího ostří ( $\kappa_r, \kappa_{r'}$ ) a poloměr špičky ( $r_\epsilon$ ).

Použití většího úhlu čela má za následek (při splnění podmínky, že hloubka řezu je větší než poloměr zaoblení ostří) lepší vnikání nástroje do obrobku a odchod třísky, čímž dojde ke snížení řezných sil a tím i ke zvýšení trvanlivosti nástroje. Toto tvrzení ovšem platí jen do té doby, než by se úhel čela zvýšil na tolik, že by oslabil břit (růst úhlu čela je na úkor snižování úhlu bříty). Při velkém oslabení bříty by mohlo dojít k zalomení a tím ke snížení trvanlivosti.

Velikost úhlu hřbetu je závislá na řezných podmínkách, především na velikosti posuvové rychlosti  $v_f$  [mm/min]. Protože se zmenšujícím se posuvem dochází ke zvyšování tření právě na hřbetu nástroje. Vlivem tohoto tření dochází k rychlejšímu otupování nástroje a tím ke snižování trvanlivosti.

Vliv úhlu nastavení hlavního ostří  $\kappa_r$  na trvanlivost je spojeno předně se závislostí teploty. Zmenšením úhlu  $\kappa_r$ , za předpokladu zachování posuvu a hloubky řezu, dojde ke zvýšení šířky, kterou zabírá břit a tím se zvětší i plocha čela, po které odchází třísky. Zvýšení této stykové plochy je příznivé pro větší odvod tepla třískou z místa řezu, čímž dojde ke zvýšení trvanlivosti. V opačném případě, tedy pokud se  $\kappa_r$  zmenšuje, narůstá současně radiální složka řezné síly. A tím klesá trvanlivost.

Podobný průběh změn je pak možné sledovat i v případě změn na vedlejším úhlu  $\kappa_r$  nebo na změně poloměru zaoblení špičky  $r_s$ . Protože při zvětšování úhlu nastavení vedlejšího ostří  $\kappa_r$  se snižuje trvanlivost nástroje a pokud je zvětšován poloměr zaoblení špičky  $r_s$ , pak se trvanlivost bříty zvýší.

[15]

#### 4.1.2 Další vlivy působící na trvanlivost bříty

Obrobitelnost materiálu je výsledkem všech vlivů (fyzikální vlastnosti, chemické složení, apod.) na kvalitativní a ekonomické výsledky procesu řezání. Obrobitelnost je pak ještě závislá na mnoha faktorech, jako například způsob výroby nebo tepelné zpracování materiálu obrobku, mikrostruktura a vliv přídavných prvků ze strany materiálové. Nebo pak ze strany stroje - metoda obrábění, tuhost celé soustavy, druh a vlastnosti nástrojového materiálu apod..

##### Vlivy na trvanlivost vyplývající z obrobitelnosti materiálu:

- fyzikální (mechanické) vlastnosti kovu – jedná se o nedílné vlastnosti každého materiálu, které je nutné brát na vědomí při obrábění (pevnost, tvrdost, tažnost, mez kluzu, mez pevnosti, tepelné vlastnosti, apod.)
- chemické složení – každý materiál používaný jako polotovar vykazuje specifické chemické složení, pouze ve velmi vyjmečných případech se jedná o chemicky čistý materiál. Každý z použitých chemických prvků přináší specifické vlastnosti do chování materiálu při obrábění (např. adhezní, difúzní vlastnosti)
- mikrostruktura – materiály mají rozdílné struktury, právě vlivem používaných příměsí se může měnit druh, velikost, tvar nebo orientace zrn
- způsob výroby a tepelné zpracování – s mikrostrukturou materiálu souvisí již způsob samotné výroby materiálu nebo jeho úpravy do formy polotovaru. Právě tyto podněty pak určují orientaci zrn nebo celkové mechanické vlastnosti.
- materiály bříty nástroje – přímo ovlivňují hospodárnost samotného obrábění. Důležité jsou vlastnosti řezného materiálu, jako odolnost proti otěru, vysoké teplotě, odolnost proti rázům, chemická stabilita i za vyšších teplot nebo dobrá tepelná vodivost.
- řezné prostředí – zásadním způsobem ovlivňuje proces řezání. Je možné ho rozdělit na přirozené (okolním vzduchem) a na umělé (procesní kapaliny, mlha ...). Řezné prostředí pak kladně přispívá ke snížení adheze, součinitele tření a odvodu tepla z místa řezu. [15]

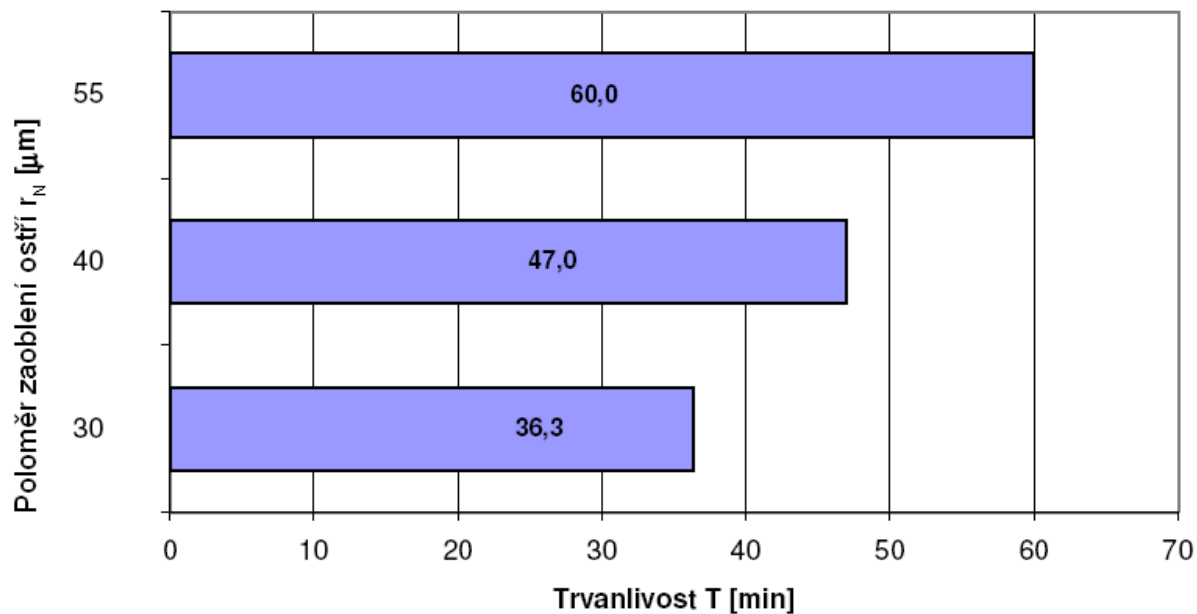
#### 4.1.3 Závislost trvanlivosti nástroje na poloměru zaoblení ostří

Potřebujeme-li stanovit optimální trvanlivost bříty pro daný řezný proces, musíme zjistit, jaké faktory konkrétního procesu nám trvanlivost budou ovlivňovat. Tyto jevy je potřeba vyhodnocovat s ohledem na to, jestli se jedná o hrubovací nebo dokončovací operaci. Dále je nutné uvážit požadavky konečného stavu obrobku. Všechny tyto stavy je nutno komplexně posoudit a porovnat. A na základě těchto úvah stanovit optimální geometrii a řezné podmínky, které zaručí požadovanou trvanlivost a hospodárnost.

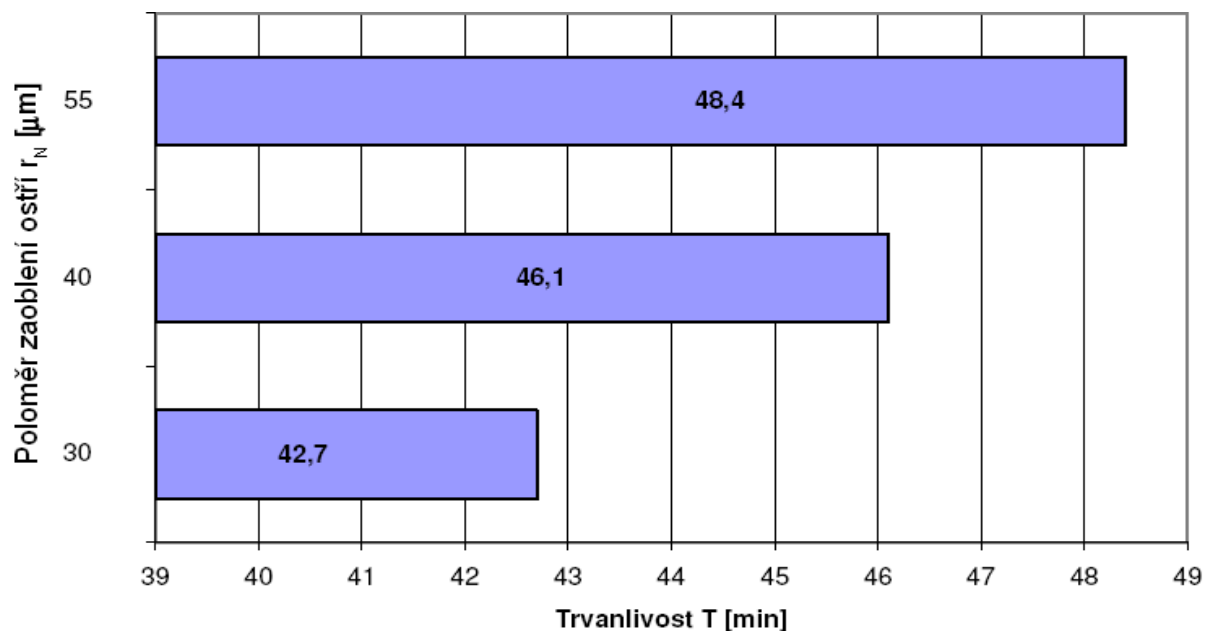
Posouzení vlivu poloměru zaoblení ostří na trvanlivost nástroje je možné hodnotit několika způsoby. Nejprehlednějším způsobem posouzení je, pokud na jednom typu materiálu provedeme zkoušku několika různých poloměrů zaoblení ostří za stejných podmínek. Pokud se do testu nedostane nějaký neočekávaný jev (náhlé opotřebení bříty například vylomením), pak je možné říci, že čím větší poloměr (viz obr. 10) tím vyšší trvanlivost. Při porovnání

následujících grafů je dále patrný velice významný vliv chlazení. Vedlejší produkt zvyšování poloměru zaoblení ostří je ovšem nárůst řezných sil.

- *Porovnání trvanlivosti pro zkoušku na oceli 12 050.1 s chlazením a bez chlazení pro vybrané poloměry zaoblení ostří:*

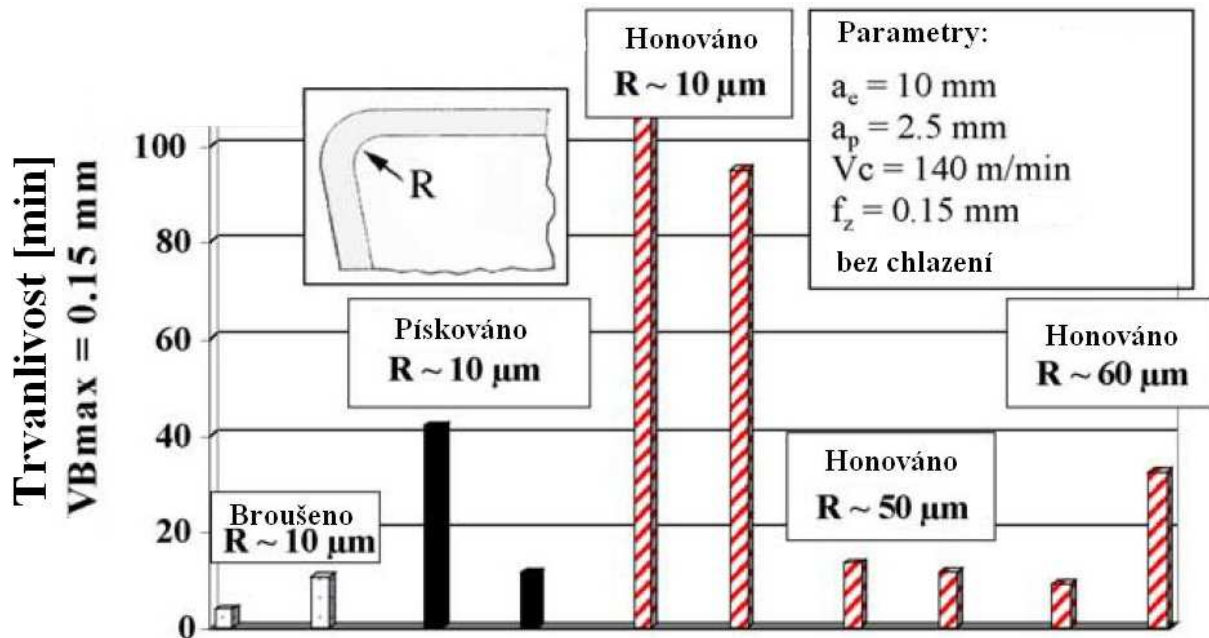


*Obr. 10a. Porovnání trvanlivostí pro zkoušku na oceli 12 050.1 s chlazením [26]*



*Obr. 10b. Porovnání trvanlivostí pro zkoušku na oceli 12 050.1 bez chlazení [26]*

Vliv poloměru zaoblení ostří nemusí být spojen pouze s velikostí tohoto poloměru. Na jiném experimentu bylo provedeno porovnání trvanlivosti s ohledem na velikost poloměru zaoblení ostří, které ovšem bylo dosaženo různými úpravami ostří (viz obrázek 11). Tento experiment vyvrací obecné tvrzení, podle kterého by ke zvýšení trvanlivosti stačilo použít větší poloměr zaoblení ostří. Tento experiment ukazuje, proč je nutné provádět další experimenty za účelem dosažení vyšší produktivity obrábění na různých druzích materiálů.



Obr. 11. Porovnání trvanlivostí s ohledem úpravu poloměru zaoblení ostří [21]

## 4.2 Vliv poloměru zaoblení ostří na řezné síly

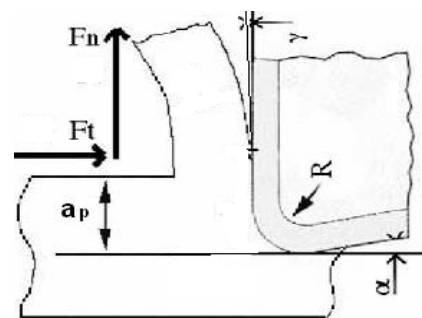
### 4.2.1 Závislost řezných sil na poloměru zaoblení ostří



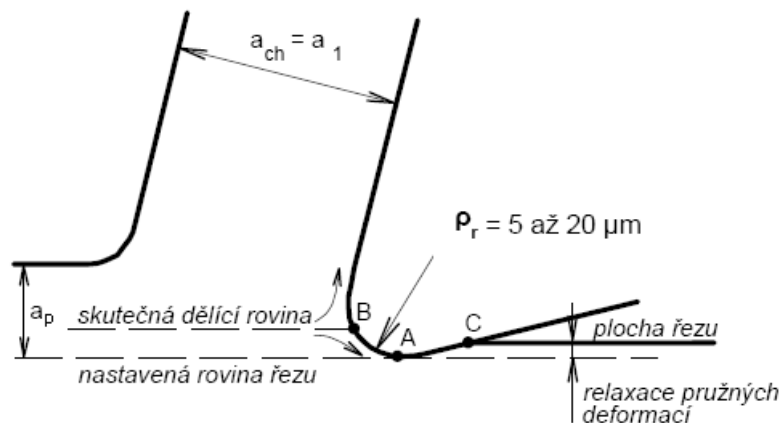
Obr. 12. Závislost produktivity destičky na radiální složce řezné síly [28]

Nejvýraznější vliv na nárůst řezné síly má samotný tvar nástroje. Tento nárůst řezné síly však musíme uvažovat v poměru k produktivitě obrábění, jak je naznačeno na obrázku 12. Po zvážení o využití tvaru destičky k dané operaci obrábění je možné teprve přistoupit k dalšímu rozhodování. Následujícím vlivem, který nám z pohledu nástroje může ovlivnit velikost řezné síly je velikost poloměru zaoblení břitu. S narůstajícím poloměrem dochází ke zhoršení vníkaní nástroje do obrobku a tím dojde k nárůstu řezných sil.

Velikost řezných sil je provázána nejen s poloměrem zaoblění břitu, ale také s hloubkou řezu. Tyto dva faktory jsou rozhodující pro směr pohybu atomů odřezávaného materiálu okolo špičky nástroje. A podle směru pohybu atomů je nástroj namáhán buď v tečném nebo normálovém směru.



Obr. 13. Základní schéma sil, působících na břit v řezu [21]



Obr. 14. Průnik poloměru zaoblění ostří do materiálu [22]

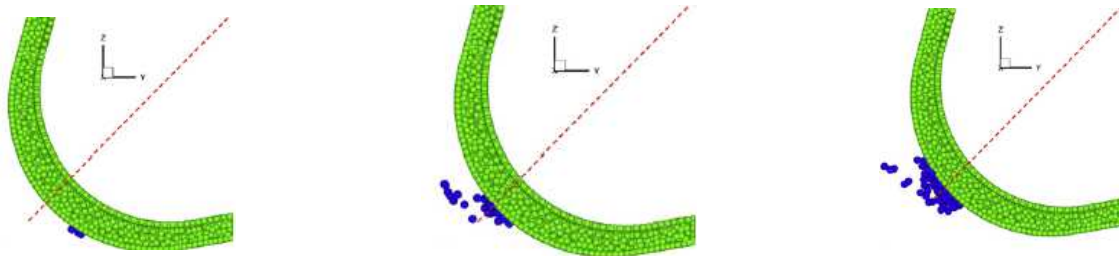
Poloměr zaoblění ostří společně s dostatečnou hloubkou řezu (hloubka řezu je v tomto případě větší než poloměr zaoblění ostří) způsobuje, že se materiál dělí v určité úrovni. Materiál, který odchází pod břit, je plasticky deformován a zpevňován (část B – A). Působící síla může povrchovou vrstvu narušit trhlinkami. Oproti tomu horní úroveň (nad dělicí rovinou) má vliv na velikost řezné síly, která působí proti posuvu. Tato část obráběného materiálu odchází ve formě třísky.

#### 4.2.2 Minimální hloubka řezu $a_p$

$$a_{p \min} = \rho_r + \rho_r \cdot \sin \gamma \quad [25]$$

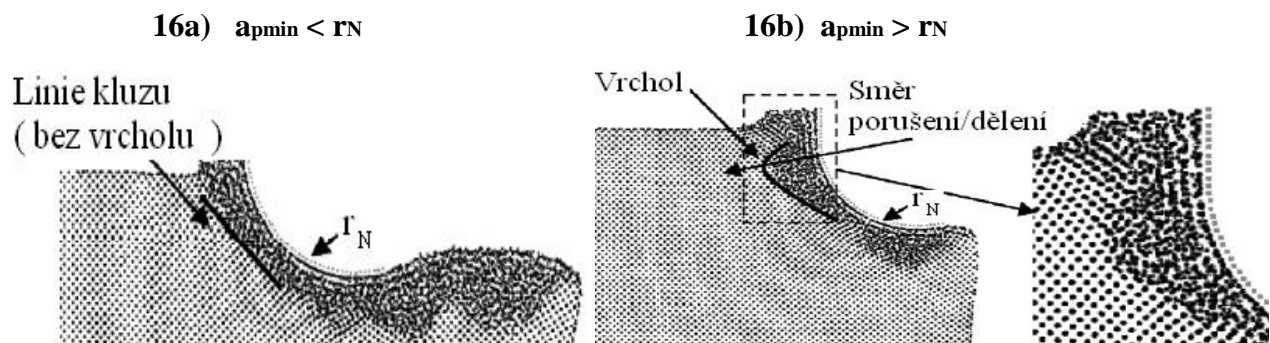
Nastane-li případ, že minimální tloušťka třísky  $a_{p \min}$  bude větší než tloušťka odřezávané vrstvy  $a$ , pak dojde k tomu, že nástroj nebude od počátečního kontaktu s obrobkem odřezávat materiál, ale začne po něm tak zvaně klouzat. Tento jev pak společně s pružnými deformacemi obráběného materiálu má za následek, že se na povrchu obrobku objevují lesklé pásy. Vlivem hromadění materiálu před břitem, se po čase obrábění nahromaděný materiál dostane na takovou hladinu, že jeho výška přesáhne  $a_{p \min}$  a dojde k odříznutí. Tento jev se bude opakovat po celou dobu obrábění až do změny stavu ostří nebo do změny řezných podmínek. Z tohoto poznatku ovšem vyplývá, že řez není kontinuální, ale periodicky přerušovaný. Doba periody pak závisí na několika faktorech, jako na stavu ostří nebo na tuhosti stroje popřípadě celé soustavy. [25]

Při detailnějším zaměření na poloměr zaoblění ostří je patrné, že každé snížení hloubky odřezávaného materiálu můžeme přirovnávat k obrábění stále zápornější geometrií. Protože v místě, kde dojde k dotyku nástroje s obrobkem, při přísuvu na plochu po normále, je možné geometrii definovat jako zápornou (úhel čela téměř  $-90^\circ$ ). Při snížení hloubky řezu pod hodnotu zaoblění ostří jsme nuceni řešit podobné problémy, jako při obrábění zápornou geometrií (výskyt chvění, nárůst řezných sil apod.).



Obr. 15. Schéma hromadění atomů materiálu před břitem, v oblasti poloměru zaoblění ostří [6]

Pohyb atomů materiálu okolo vnikajícího řezného břitu s ohledem na hloubku řezu lze rozdělit na dva způsoby. Jak již bylo naznačeno, jsou to způsoby kdy za **a)** materiál je deformován a zpevněn pod břitem a po určitém čase dojde k jeho oddělení. Nebo za **b)** kdy hloubka řezu je větší než poloměr zaoblění ostří a materiál je kontinuálně odřezáván a odváděn ve formě třísky po čele nástroje. Z naznačené linie (obr. 16.) pak lze velice snadno prokázat tvrzení, že čím je větší hloubka řezu, tím větší bude za potřebí posuvová síla k odebrání materiálu. Právě kvůli směru porušení materiálu a hromadění atomů pod nebo nad břitem v řezu. V případě **16a)** bude narůstat normálová síla, protože vlivem deformace materiálu pod břit, bude břit nástroje „odtláčován“ od obrobku. Ale v případě **16b)** bude více znatelná tečná síla, která bude působit proti posuvu. Tato síla je vyvolána množstvím materiálu na čele nástroje a velikost tečné síly proto závisí na hloubce řezu.



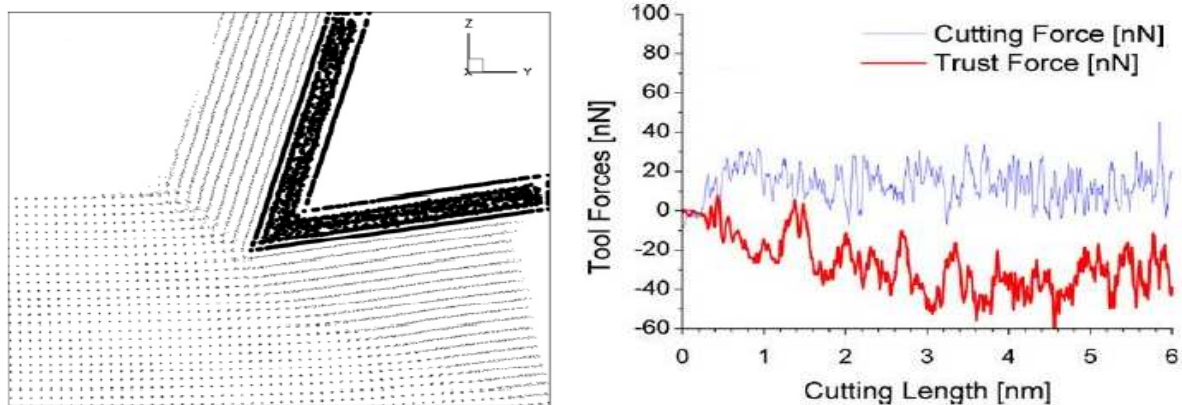
Obr. 16. Linie kluzu atomů materiálu okolo vnikajícího řezného břitu s ohledem na hloubku řezu [22]



### 4.2.3 Porovnání řezných sil s ohledem na $r_N$ a vliv $a_p$

Základní způsoby průběhů řezných sil s ohledem na velikost poloměru zaoblení ostří a současně s vlivem hloubky řezu je možné představit na třech základních případech. Prvním případem s velice specifickým chováním (průběhem řezných sil) je použití dokonale ostrého břitu. Další dva případy jsou si navzájem podobné, je zde nastaven poloměr zaoblení ostří, vůči kterému se mění hloubka řezu.

#### 4.2.3.1 Dokonale ostrý břit



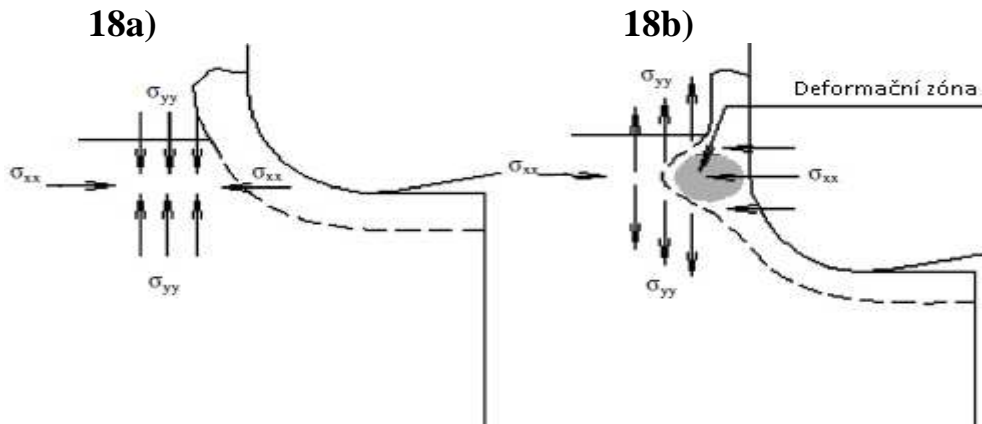
Obr. 17. Ideový případ, obrábění dokonale ostrým nástrojem [6]

Obrázek 17 znázorňuje dokonale ostrý břit, tedy nulový poloměr zaoblení ostří. Tento případ je možné vyloučit z úvahy o použití i bez testování. Příčin je zde hned několik!

- není možné dosáhnout dokonale ostrého břitu
- tento tvar je naprosto nevhodný pro obrábění a v praxi by došlo k velice rychlému otupení – zlomení -> tedy trvanlivost takového nástroje by končila prvním kontaktem s obrobkem

Řezné síly takového břitu (získané z modelové situace pomocí SW) jsou pak zkrácené právě tím, že dokonale ostrý břit vniká mezi atomy obráběného materiálu a tím nedochází k odtrhávání v místech, které bylo popsáno jako vrchol (viz obrázek 16b). Tím pádem získáváme i velmi malé/záporné tlakové síly (thrust force). Protože odpor, nebo-li řeznou sílu, zde vytváří pouze atomy nahromaděné na čele nástroje. „Dokonalým“ vniknutím nástroje do materiálu dojde vlivem spojitosti materiálu k „přizvedávání“ vrstvy pod nástrojem, jak naznačují vrstvy atomů v levé části obrázku 17, pod břitem.

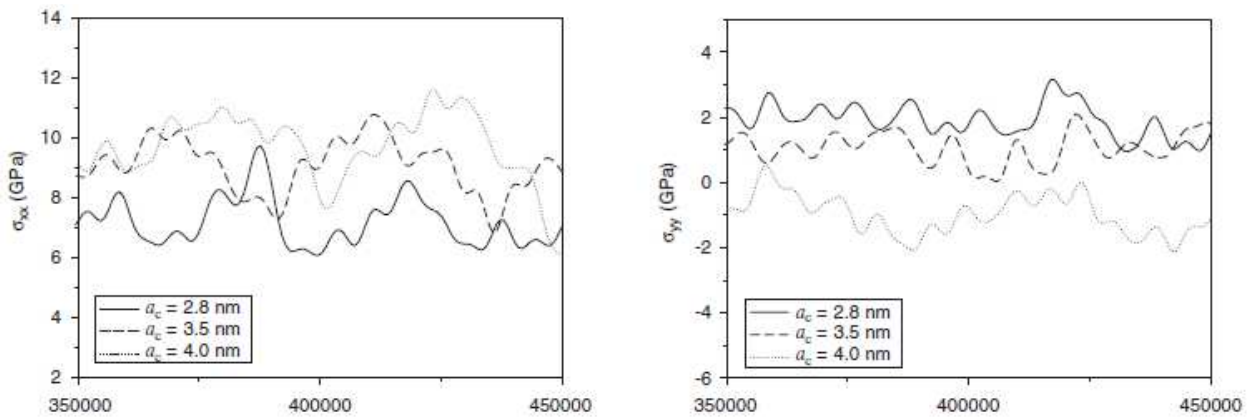
#### 4.2.3.2 Vliv hloubky řezu na řezné síly



**Obr. 18.** Schéma napětí v obrobku a)  $a_p < r_N$  b)  $a_p > r_N$  [22]

Schéma napětí v obrobku, pořízené počítačovou simulací, v případě 18a) prokazuje, jakým směrem se budou ubírat atomy obráběného materiálu, bude-li poloměr zaoblení ostří větší než hloubka řezu. Z naznačeného napětí vyplývá, že povrchová vrstva bude vtlačována pod břit a bude zde docházet k většímu zpevnění materiálu. Současně se atomy, které nebudou vtlačeny pod břit, budou hromadit před břitem a ve chvíli, kdy bude dosaženo větší vrstvy, dojde k oddělení a odejdou ve formě třísky.

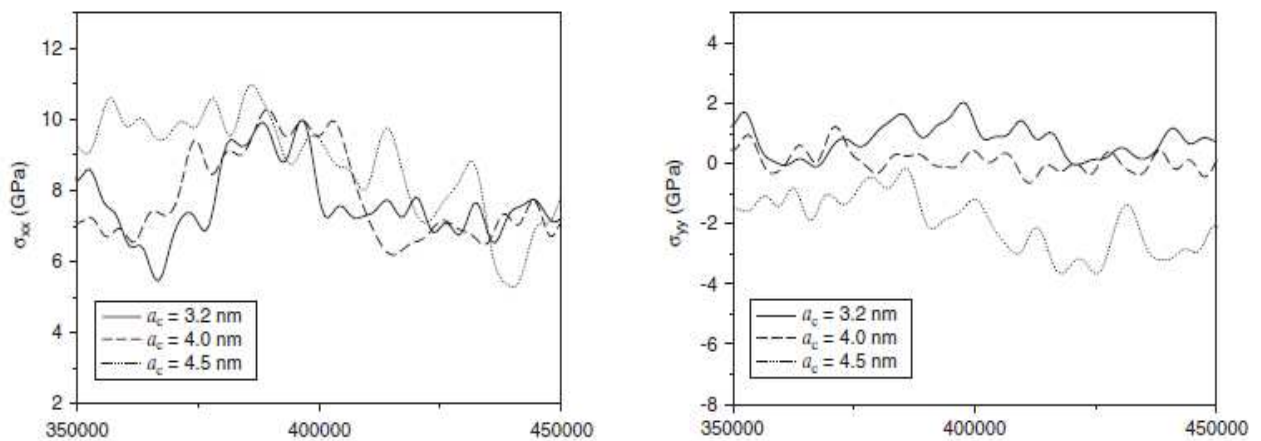
Případ 18b) znázorňuje stav, kdy poloměr zaoblení ostří je menší než hloubka řezu. Atomy obráběného materiálu se hromadí a deformují pod povrchem obrobku v místě označeném jako deformační zóna. Vlivem posuvu a geometrie nástroje dojde v tomto místě k rozrušení materiálu do dvou vrstev. Jedna, která je vtlačována pod břit a druhá, která kontinuálně odchází po čele nástroje ve formě třísky. Odřezávání materiálu je v tomto případě plynulé.



**Obr. 19.** Porovnání složek napětí pro 3 různé hloubky řezu s ohledem na velikost poloměru zaoblení ostří  $r_N = 3,5\text{nm}$  a  $v_c = 20\text{m/s}$  [22]

Síla působící v ose x popisuje sílu, která působí proti posuvu nástroje. V případě, že  $a_c < R$  ( $a_c = 2,8\text{ nm}$ ), vykazuje tato síla nejnižší hodnotu. Na tomto příkladu je možné prokázat tvrzení, že největší odpor proti posuvu je tvořen hromaděním materiálu na čele břitu (tedy s narůstající hloubkou řezu). Což potvrzuje i porovnání s  $a_c > R$  ( $a_c = 4,0\text{ nm}$ ).

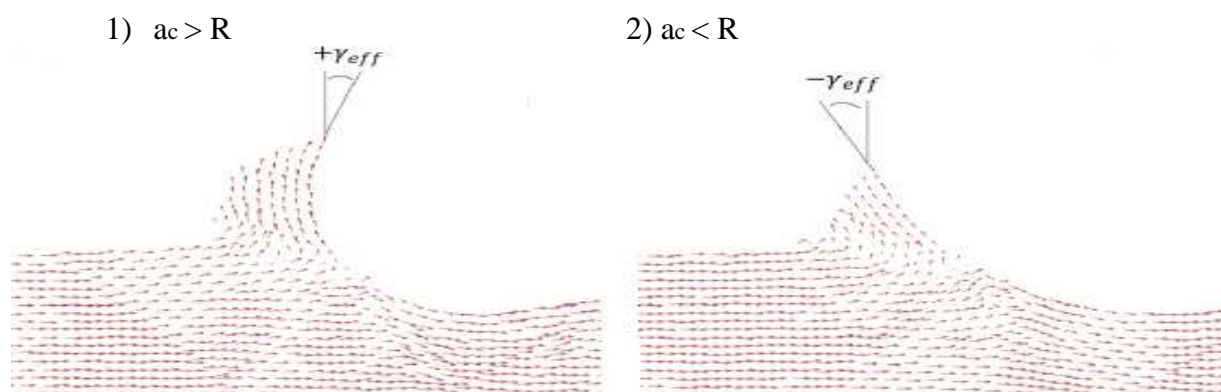
Nižší posuvový odpor je však dosažen na úkor zvýšení síly v ose y, kterou je možné obecně popsat jako normálovou sílu k povrchu obrobku. Ta má za následek „odtláčování“ nástroje od povrchu. V tomto okamžiku hraje velikou roli tuhost celé soustavy. Nevhodná tuhost (starý stroj, popř. nevhodná konstrukce soustavy) by měla za následek zhoršení drsnosti obrobenej plochy.



**Obr. 20.** Porovnání složek napětí pro 3 různé hloubky řezu s ohledem na velikost poloměru zaoblení ostří  $rN = 4\text{nm}$  a  $vc = 20\text{m/s}$  [22]

Zvýšením poloměru zaoblení ostří dosáhneme v případě, že  $a_c < R$  ( $a_c = 3,2\text{ nm}$ ), podobného průběhu odporu proti posuvu jako u nižších poloměrů. Jen s tím rozdílem, že se zvětšujícím se poloměrem zaoblení ostří dojde k nárůstu odporu, tedy ke zvýšení síly ve směru x. Pokud ovšem současně zvýšíme hloubku řezu ( $a_c > R$ ), pak zaznamenejme po určitém čase obrábění mírné snižování odporu. To lze vysvětlit kontinuálním rozrušováním materiálu.

Průběh normálové síly se nijak zásadně neliší od předchozího případu. Z toho vyplývá, že při zvýšení poloměru zaoblení ostří s vlivem na normálovou sílu byl zachován bod dotyku povrchu obrobku s bodem na poloměru ostří. Tím nedošlo ke změně úhlu řezu a průběh řezných sil je podobný.



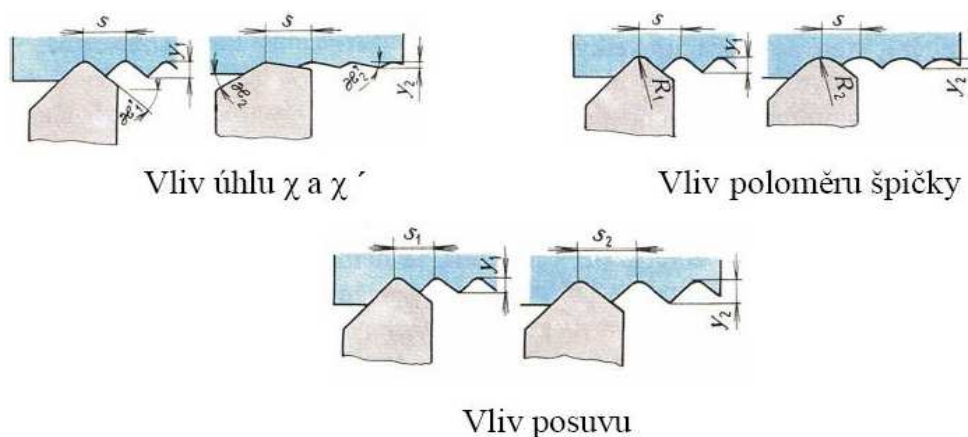
**Obr. 21.** Změna úhlu čela vlivem hloubky řezu a poloměru zaoblení ostří [6]

### 4.3 Vliv poloměru zaoblení ostří na výsledný povrch

#### 4.3.1 Vlivy geometrie nástroje na výsledný povrch

Drsnost obrobenej plochy je dána především řeznými podmínkami a použitým nástrojem. Profily drsnosti obrobenej povrchu jsou pak výstupem stop, které jsou vytvořeny břity řezného nástroje. Ty se odvíjejí od parametrů nástroje, nastavených řezných podmínek a vlastností obráběného materiálu.

Vlivy geometrie nástroje a řezných podmínek na výsledný povrch jsou dobře patrné při soustružení. Zde je nejvíce ovlivněn povrch úhlem nastavení hlavního a vedlejšího ostří ( $\chi_r$  a  $\chi'_r$ ) nebo poloměrem zaoblení špičky. Tyto dva parametry s kombinací velikosti posuvu utvářejí povrch obrobku, jak je patrné z naznačených schémat.



Obr. 22. Vliv geometrie nástroje na výsledný povrch [29]

Zvětšování poloměru zaoblení špičky snižuje, respektive zlepšuje drsnost obrobenej povrchu, za předpokladu nízkých posuvových rychlostí a malé hloubky řezu. Nejvíce ovlivňujícím parametrem drsnosti povrchu je tedy v tomto případě posuvová rychlost. Další pozitivní přínos ke zlepšení povrchu mají procesní kapaliny, které mají mazací účinek. Použitím těchto kapalin dosáhneme snížení tření na stykové ploše třísky a nástroje a tím ovlivníme možnost vzniku nárůstku, který má nepříznivý vliv na finální povrch. V souvislosti s vlivem posuvu, geometrie a řezného prostředí je nutný ještě zmínit celkový vliv tuhosti celé soustavy S-N-O-P. [29]

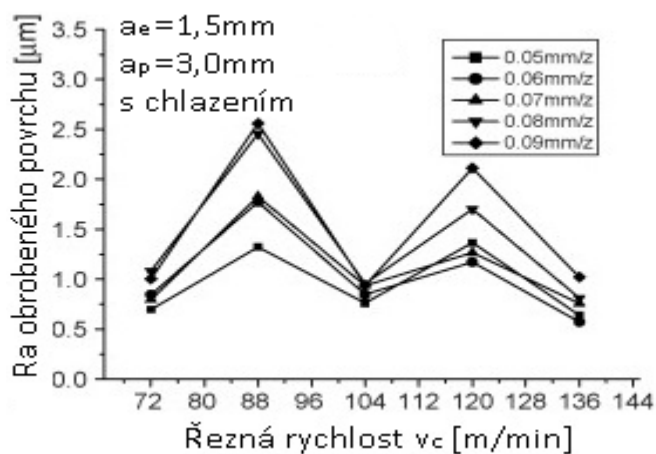
#### 4.3.2 Vliv poloměru zaoblení ostří na výsledný povrch

Výsledný povrch je ovlivňován různými faktory. Jejich vliv může být předvídatelný, ale také absolutně nečekaný. Mluvíme-li o předvídatelných faktorech, tak ty můžeme očekávat například na základě již uskutečněných experimentů. Tím je myšleno, že pokud obrábíme materiál, na kterém již byl proveden experiment s následným hodnocením drsnosti obrobenej povrchu, tak za předpokladu stejných řezných podmínek můžeme očekávat podobný průběh utváření povrchu.

Nečekaný jev se bohužel může objevit ve všech fázích experimentu. Pokud je řezný proces ovlivněn nějakým neočekávaným způsobem. Například nestejnorodostí materiálu, která vede k jinému průběhu trvanlivosti břitu, popřípadě jeho zásadnější narušení nebo je

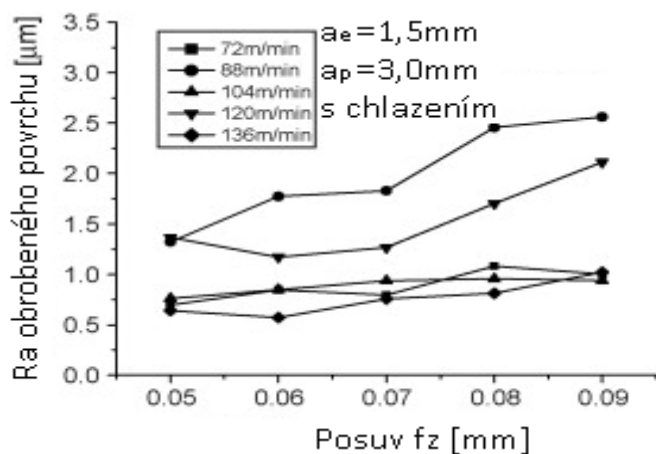
proces narušen okolními jevy (např. otřesy), pak je nutné provádět hodnocení drsnosti obrobeneho povrchu častěji, především s ohledem na charakter výrobku u výstupní kontroly.

### Vliv parametrů řezného procesu na drsnost obrobeneho povrchu:



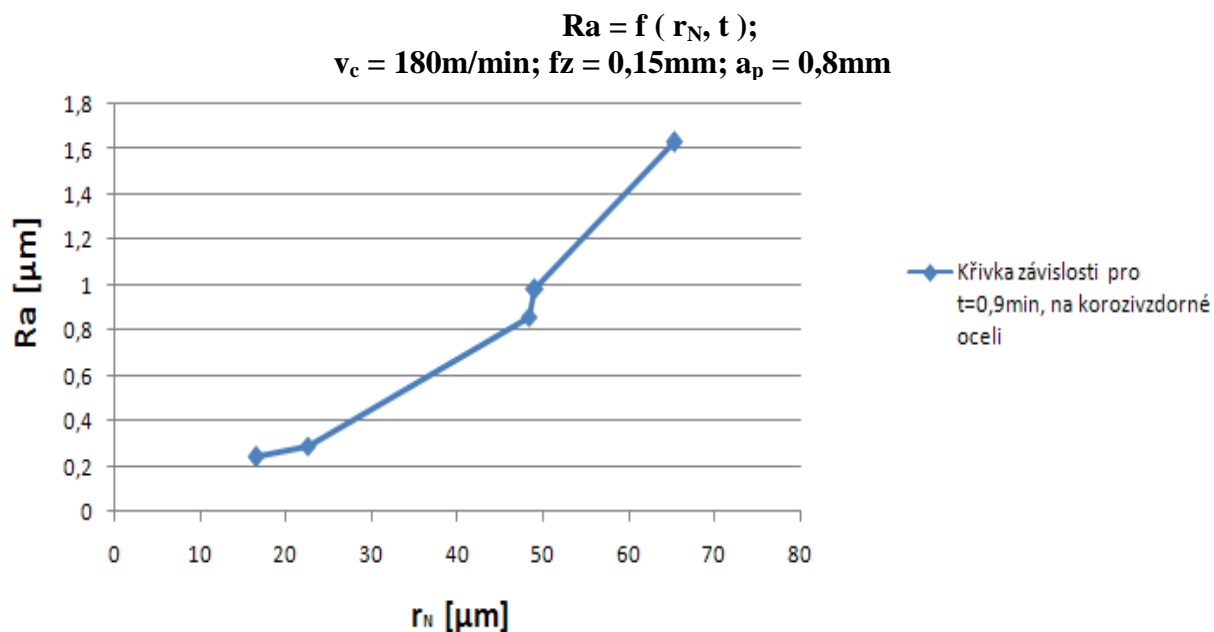
Obr. 23. Vliv řezné rychlosti na drsnost ( $R_a$ ) obrobeneho povrchu [23]

Zásadním způsobem se na drsnosti obrobeneho povrchu projevují parametry řezného procesu. Na obrázku 23 můžeme sledovat zhoršující se drsnost obrobeneho povrchu  $R_a$  v pásmech řezné rychlosti 72 – 104 m/min a 104 – 136 m/min. Z teoretických znalostí, získaných experimentální činností je známo, že právě tyto pásma jsou náchylné na vznik nárůstku (BUE). Vlivem nárůstku dojde ke změně geometrie nástroje v místě řezu a to má za následek zhoršení parametrů drsnosti povrchu.



Obr. 24. Vliv posuvu na drsnost ( $R_a$ ) obrobeneho povrchu [23]

Obrázek 24 znázorňuje závislost velikosti nastaveného posuvu na drsnost  $R_a$  obrobeneho povrchu. Tato závislost potvrzuje fakt, že se zvyšujícím se posuvem se zhoršuje drsnost obrobeneho povrchu. To je způsobeno tím, že dráhy nástroje se vlivem zvyšující se posuvové rychlosti oddalují a vznikají mezi nimi tzv. vlnky na obráběném povrchu, které se negativně projevují na celkové drsnosti obrobeneho povrchu.



*Obr. 25. Vliv poloměru zaoblení ostří na  $Ra$  obrobeného povrchu [17]*

Poloměry zaoblení ostří:	
$r_N$	16,4
	22,5
	48,3
	49
	65,3

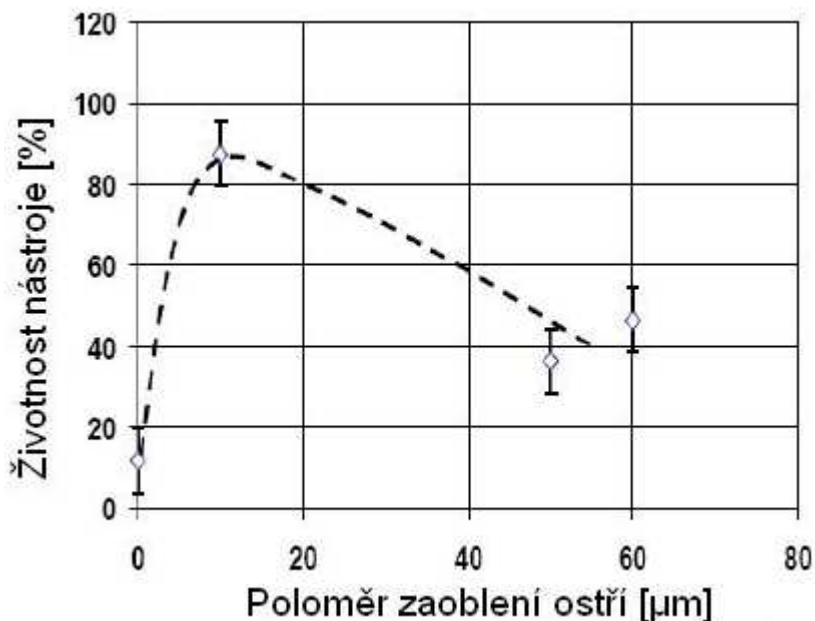
Z grafu závislosti drsnosti  $Ra$  obrobeného povrchu na poloměru zaoblení ostří  $r_N$  je tento fakt patrný. Těchto hodnot bylo dosaženo experimentem, který byl prováděn na korozivzdorné oceli P91. Parametry byly vyhodnocovány na jednotlivých poloměrech zaoblení ostří po čase  $t=0,9\text{min}$ .

Průběh prokazující zhoršení  $Ra$  obrobeného povrchu se zvětšujícím se  $r_N$  v tomto případě potvrzuje obrázek 25.

## 5 Shrnutí teoretických poznatků

Mikrogeometrie nástroje je jedním z rozhodujících faktorů, které ovlivňují řezný proces. Především stav ostří, jehož vývoj je v průběhu řezného procesu silně ovlivněn mikrogeometrií a celkovou geometrií nástroje.

Zaměříme-li se na vliv mikrogeometrie nástroje na řezný proces, konkrétně na vliv poloměru zaoblení ostří na trvanlivost nástroje, pak z teoretických poznatků vyplývá, že se zvětšujícím se poloměrem zaoblení ostří se zvětšuje i trvanlivost nástroje (viz kapitola 4.1). Z obrázku 26 je ovšem patrné, že tato závislost platí přibližně v intervalu poloměrů zaoblení ostří 10 až 20  $\mu\text{m}$ .



Obr. 26. Závislost životnosti nástroje na velikosti poloměru zaoblení ostří [17]

Další poznatek, který plyne z teorie o vlivu poloměru zaoblení ostří, je zaměřen na průběh řezných sil. Říká, že se zvětšujícím se poloměrem zaoblení ostří se zvětšují i řezné síly. Tento jev je způsoben tím, že nástroj s větším poloměrem zaoblení ostří hůře vniká do materiálu, než nástroj s menším poloměrem zaoblení ostří (viz kapitola 4.2).

Velikost poloměru zaoblení ostří má také přímý vliv na drsnost obrobeného povrchu. Teorie v tomto případě říká, že se zvětšujícím se poloměrem zaoblení ostří dochází ke zhoršování parametrů drsnosti obrobeného povrchu. Tento vliv poloměru zaoblení ostří na drsnost obrobeného povrchu spojuje vliv geometrie nástroje a současně vliv řezných podmínek na výslednou drsnost obrobeného povrchu (viz kapitola 4.3).

Celkové vlivy mikrogeometrie nástroje, které se projevují na řezném procesu, je možné takto souhrnně specifikovat. Ale ve skutečnosti jsou tyto souhrnné specifikace narušeny neočekávanými jevy, které vstoupí do řezného procesu v průběhu obrábění a může tak dojít k jejich změnám.

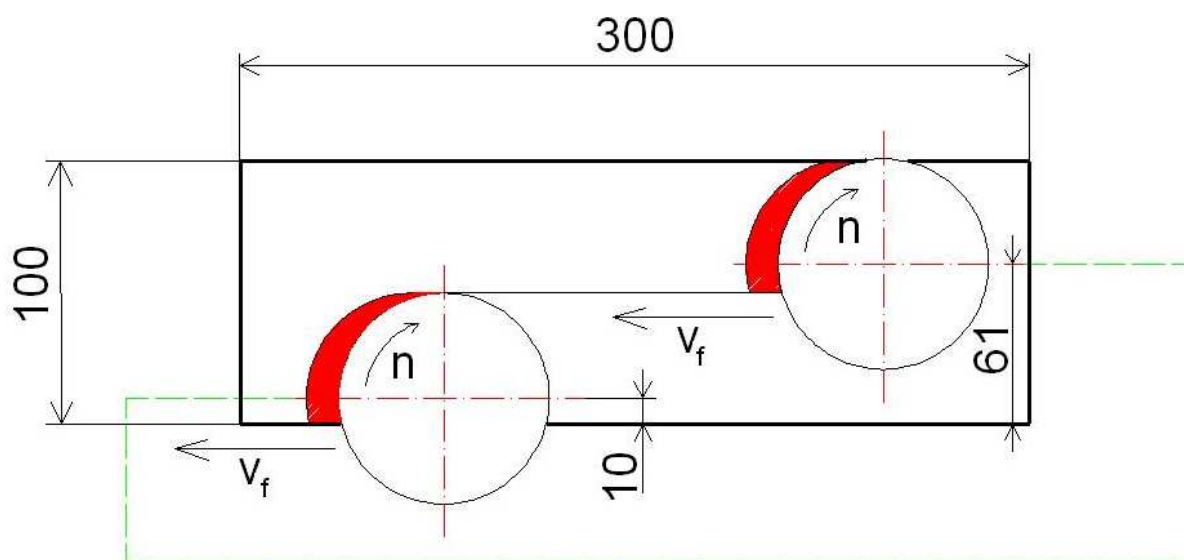
## 6 Experimentální část

### 6.1 Charakteristika experimentu

Experiment byl proveden v halových laboratořích katedry technologie obrábění ZČU v Plzni a byl realizován v rámci řešení projektu SGS-2012-023, jehož cílem je stanovit soubor obecně aplikovatelných poznatků a doporučení pro obrábění korozivzdorné oceli P91. Sestavení takového souboru vyžaduje získání dalších a podrobnějších poznatků o obrábění tohoto materiálu. Především podrobněji analyzovat průběh řezného procesu a zaměřit se na zásadní vlivy, které ovlivňují řezný proces a blíže je charakterizovat.

Zmíněná hodnocení byla prováděna na experimentálním obrobku z materiálu P91. Obráběná plocha o rozměrech 100mm x 300mm (š x d - viz kinematické schéma) byla obráběna dokončovacími VBD typu IN04S od firmy Ingersoll. Destičky byly tangenciálně uloženy ve frézovací hlavě s označením INGERSOLL L3058353 6F2B080R00. Plocha byla obráběna na dva přejezdy nástroje. První, když střed frézovací hlavy byl nastaven 10mm od hrany obrobku. A druhý, kdy je pozice středu nastavena 61mm od hrany obrobku. Tím bylo docíleno překrytí dráhy nástrojů. Jednalo se o sousledné frézování s aplikací záplavového chlazení.

Experimentální část byla rozdělena do dvou fází. První fází byl pre-experiment, jehož cílem bylo zvolit vhodné řezné podmínky pro experiment (druhá fáze) na základě pozorování řezného procesu. Cílem druhé fáze experimentu bylo vybrat vhodný poloměr zaoblení ostří. Vhodný poloměr zaoblení ostří, který byl vybrán na základě experimentu, byl pak použit pro další vyhodnocení. Vyhodnocený poloměr zaoblení ostří, s nejlepšími vlastnostmi, představoval vstupní parametr pro následující experimentální činnost. Následující experimentální činnost se zabývala vlivem přípravy poloměru zaoblení ostří a byla prováděnou kolegou, Bc. Jaroslavem Krčmou v rámci diplomové práce.

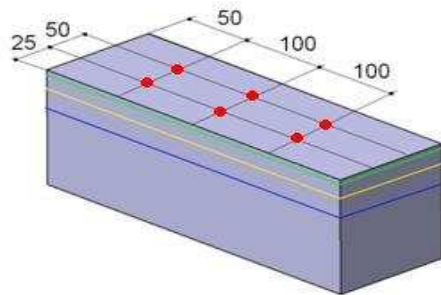


Obr. 27. Kinematické schéma obrábění při experimentu

Pro analýzu řezného procesu bylo hodnoceno opotřebení nástroje ve vybraných hladinách (pro všechny VBD stejný počet přejezdů – stejná doba řezu, stejné množství odebraného materiálu - viz obrázek 3). Současně bylo v těchto vybraných hladinách



provedeno měření drsnosti obrobeného povrchu (pro porovnání s opotřebením na nástroji). Dále byl sledován průběh řezných sil. Řezné síly byly vyhodnocovány ve všech hladinách. Na základě těchto nashromážděných dat bylo provedeno experimentální hodnocení vlivu poloměru zaoblení ostří na řezný proces.



- 10 odebraná hladina (celkem 6 cm<sup>3</sup>)
- 50 odebraná hladina (celkem 30 cm<sup>3</sup>)
- 100 odebraná hladina (celkem 60 cm<sup>3</sup>)
- měření drsnosti obrobeného povrchu

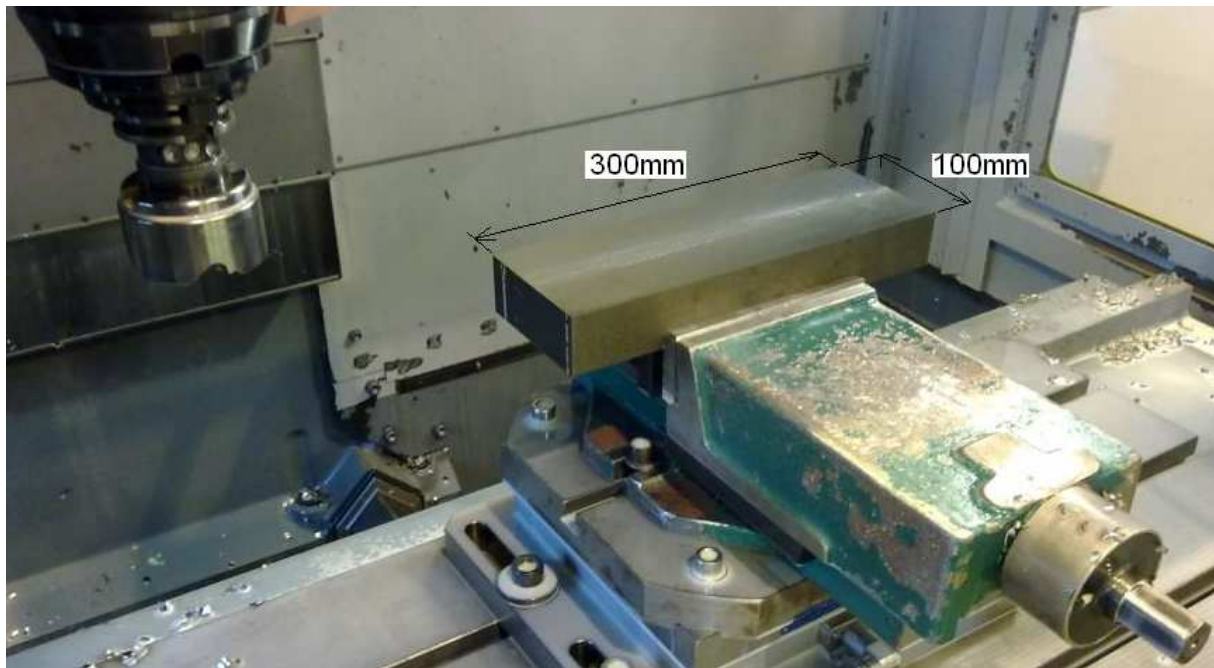
Obr. 28. Schéma hladin pro odběr dat

#### Kritériální podmínky byly stanoveny:

- Kritériální hodnota opotřebení nástroje < 0,15 mm
- Parametr drsnosti povrchu  $R_a < 0,8 \mu\text{m}$
- Minimální objem odebraného materiálu, bez poškození destičky nebo bez nadměrného zhoršení drsnosti obrobeného povrchu byl 60cm<sup>3</sup> ( $V > 60\text{cm}^3$ )

## 6.2 Materiál

Jako materiál obrobku byla použita korozivzdorná, feriticko-martenzitická ocel. Konkrétně ocel EN ISO X12CrMoVNbN9-1 (ČSN 17 119, DIN 1.4903). Materiál je však více znám pod obchodním označením P91.



Obr. 29. Upnutí polotovaru

### 6.3 Nástroj



Frézovací hlavice o průměru 80 mm od společnosti Ingersoll typu :

**INGERSOLL L3058353**

**6F2B080R00**

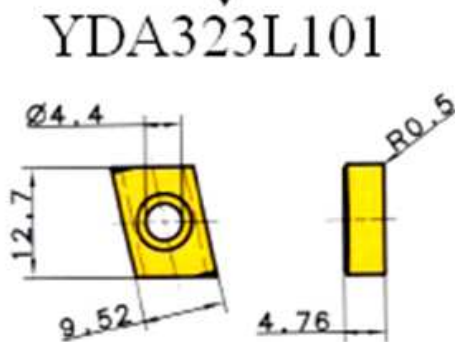
se čtyřmi pozicemi pro vyměnitelné břitové destičky, které jsou tangenciálně uloženy do hlavice pomocí stavěcích šroubů.

Vyměnitelné břitové destičky byly použity od výrobce Ingersoll. Kód těchto dokončovacích destiček:

**YDA323L101 – IN04S**

Tento typ vyměnitelné břitové destičky ze submikronového slinutého karbidu je určen pro obrábění hliníku s vysokým obsahem křemíku, pro vysoké řezné rychlosti a pro lehké a středně těžké obrábění šedé litiny. Typ destičky byl zvolen na základě předchozích experimentů, kde se nejvíce osvědčil typ IN2004 deponovaný vrstvou TiAlN. Na základě vlastností této destičky byl zvolen typ substrátu IN04S (bez povlaku) pro destičky, které byly použity pro experiment.

Na destičkách byly firmou Hofmeister vytvořeny různé poloměry zaoblení ostří ( $r_N = 5; 10$  a  $15 \mu\text{m}$ ).



Obr. 30. Nástroj s vyměnitelnou břitovou destičkou

### 6.4 Experimentální zařízení

#### 6.4.1 Strojní vybavení

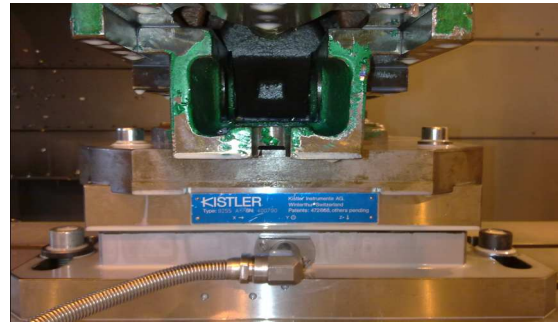


- Druh: vertikální obráběcí centrum
- Typ: MCV 750 A
- Počet CNC řízených os: 3
- Jmenovitý výkon vřetena: 16 kW
- Rozsah otáček vřetena: 20 - 13000 ot/min
- Změna otáček: plynulá
- Zdvih v ose X, Y, Z: 750, 500, 500 mm
- Rozměry upínacího stolu: 1000 x 500 mm
- Pracovní posuvy X, Y, Z: 1-15000 mm/min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

Obr. 31. MCV 750 A

### 6.4.2 Zařízení na měření řezných sil

- Tříosložkový piezoelektrický dynamometr Kistler
- Řadič
- Zesilovač
- Měřicí karta
- PC pro zaznamenávání dat (program LabVIEW)



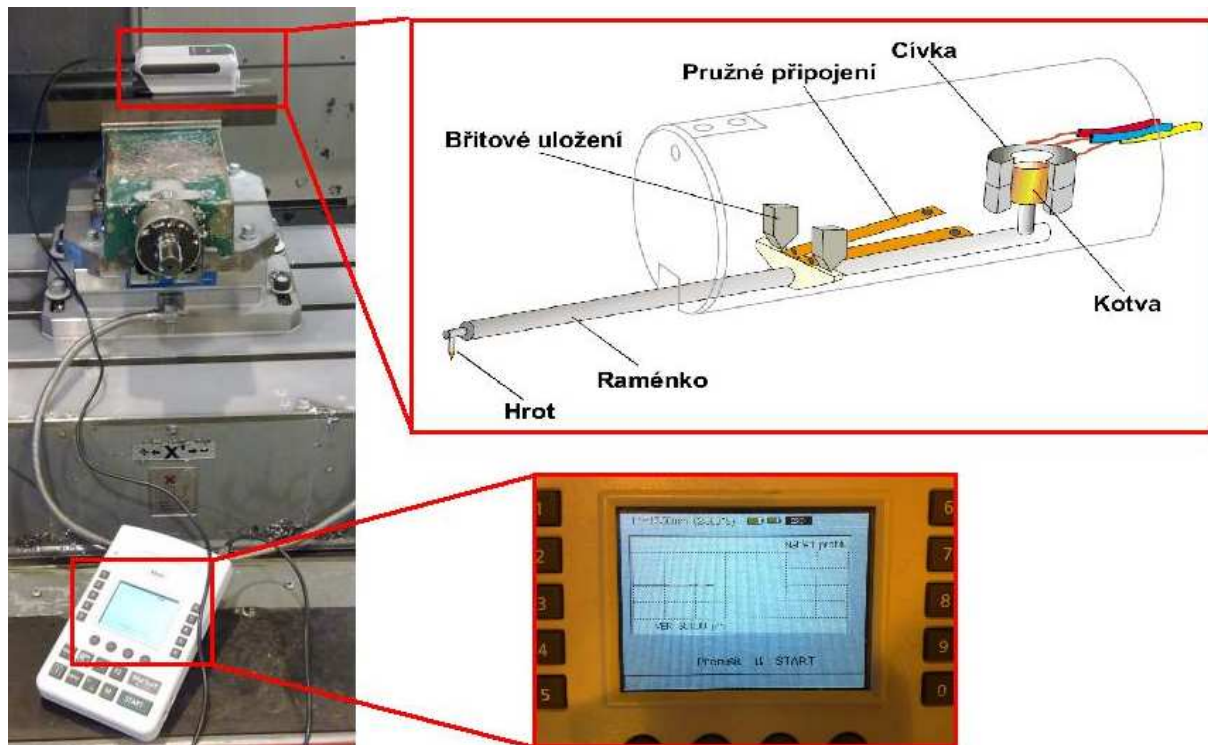
Obr. 32. Upnutí svěráku a dynamometru



Obr. 33. Schéma pracoviště pro měření řezných sil

### 6.4.3 Zařízení na měření výsledného povrchu

- Drsnoměr Mahr MarSurf M300



Obr. 34. Příslušenství MarSurf M300

### 6.4.4 Zařízení na měření opotřebení nástroje

- Mikroskop (měření opotřebení nástroje)



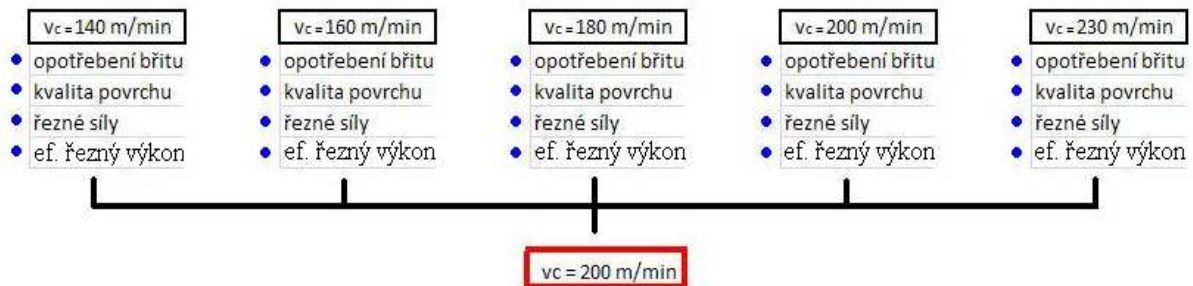
Obr. 35. Schéma pracoviště pro měření opotřebení na nástroji

## 7 Pre-experiment

Řezné podmínky pre-experimentu:

PRE-EXPERIMENT			
Řezná rychlost	$v_c$	140,160,180, 200,230	[m/min]
Posuv na zub	$f_z$	4,5	[mm]
Hloubka řezu	$a_p$	0,02	[mm]
Sousledné frézování			
Záplavové chlazení			

Některé řezné podmínky, jako posuv na zub, hloubka řezu a strategie frézování (sousledné fr) byly konstantní. Jako proměnné veličiny lze označit řeznou rychlost, která byla porovnáвана v několika hodnotách. Chlazení, které bylo záplavové, lze považovat také jako konstantu. Pouze u vybrané řezné rychlosti 200 m/min byla ověřena nevhodnost obrábění za sucha (překročení kritériálního opotřebení). Obrábění za sucha mělo velice špatný vliv na trvanlivost nástroje.



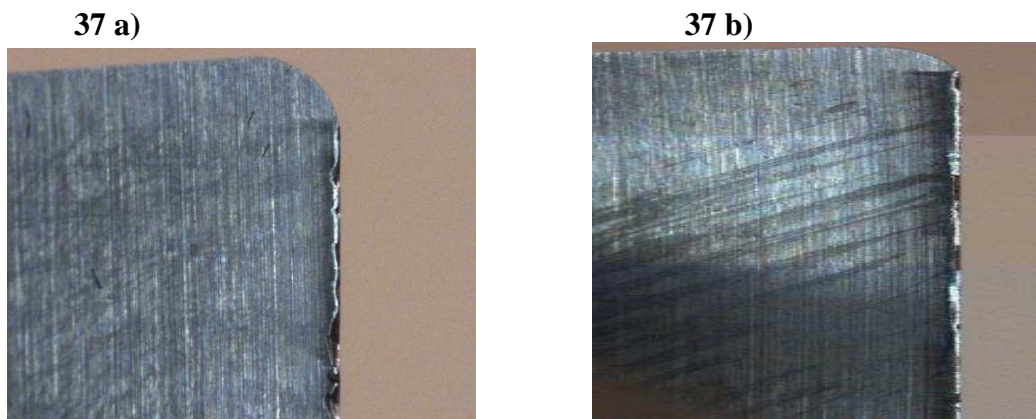
Obr. 36. Schéma pre-experimentu

Pro zvolené řezné rychlosti byl postupným obráběním (viz kinematické schéma) sledován průběh řezného procesu. Hodnocené parametry při pre-experimentu (opotřebení břítu, drsnost obrobeného povrchu, řezné síly a efektivního řezného výkonu) byly posuzovány jednotlivě, pro každou řeznou rychlost a následně vyhodnoceny. Na základě těchto dat byla zvolena nejvhodnější řezná rychlost ( $v_c = 200 \text{ m/min}$ ) pro samotný experiment.

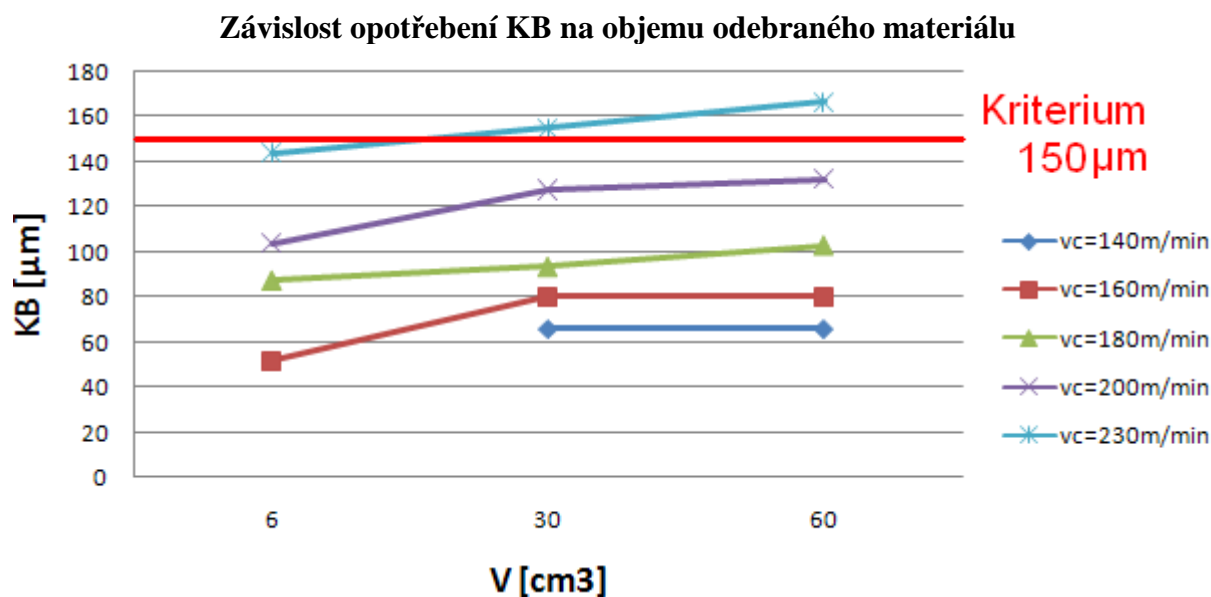
Dle zkušeností z předchozích experimentů, prováděných na feriticko-martenzitické oceli, bylo předpokládáno, že lepších výsledků je dosaženo obráběním za přítomnosti chlazení (v tomto případě záplavové). Tento předpoklad byl testován na zvolené řezné rychlosti ( $v_c = 200 \text{ m/min}$ ) a následně potvrzen. V případě obrábění za sucha bylo překročeno kritérium pro opotřebení nástroje.

## 7.1 Určení vhodné řezné rychlosti pro experiment

Vzhledem ke snaze dosáhnout při obrábění co možná nejvyšší efektivity, byly řezné rychlosti hodnoceny od nejvyšší. Řezná rychlost  $v_c = 230 \text{ m/min}$  musela být pro nesplnění kritériálních podmínek (opotřebení nástroje) vyloučena i za přítomnosti procesní kapaliny. Řezná rychlost  $v_c = 200 \text{ m/min}$  splňovala všechna nastavená kritéria a v porovnání s ostatními řeznými rychlostmi byla nejproduktivnější. Proto byla zvolena pro následující experiment.



**Obr. 37:** Překročení kritériálního opotřebení na čele nástroje (KB)  
a) při řezné rychlosti 230 [m/min] s chlazením  
b) při řezné rychlosti 200 [m/min] bez chlazení



Obr. 38. Porovnání zvolených řezných rychlostí v závislosti na opotřebení nástroje

## 8 Experiment

Řezné podmínky experimentu:

EXPERIMENT			
Řezná rychlost	$v_c$	200	[m/min]
Posuv na zub	$f_z$	4,5	[mm]
Hloubka řezu	$a_p$	0,02	[mm]
Sousledné frézování			
Záplavové chlazení			

Pro zvolenou řeznou rychlost  $v_c = 200\text{m/min}$  byly metodou omílání připraveny tři poloměry zaoblení ostří:

- $r_N = 5\ \mu\text{m}$
- $r_N = 10\ \mu\text{m}$
- $r_N = 15\ \mu\text{m}$

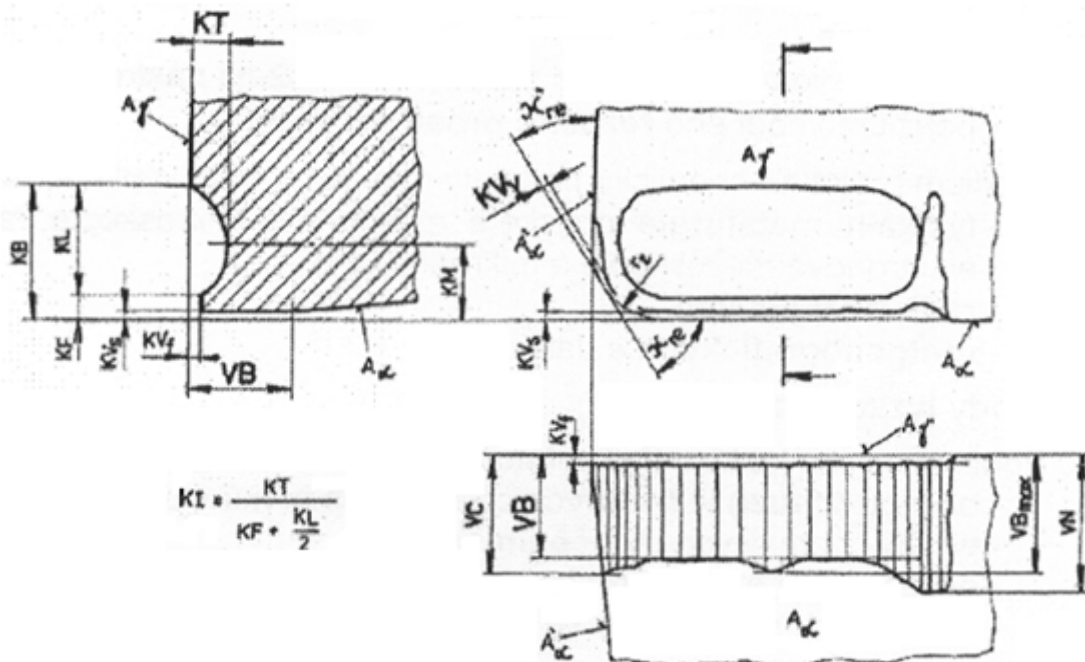


Obr. 39. Řezný proces

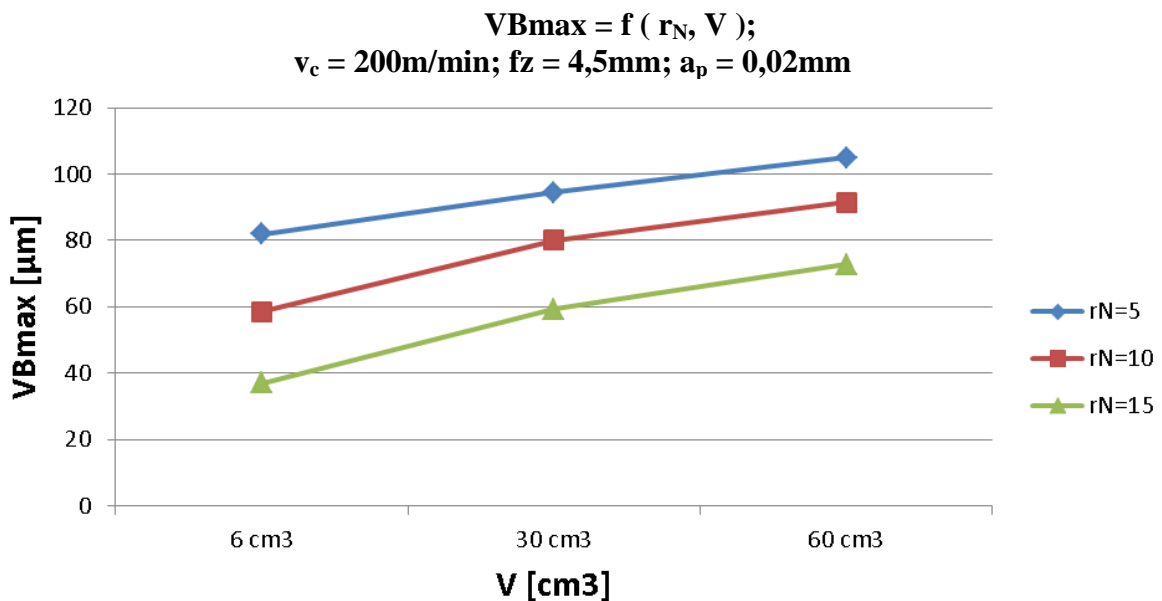
V průběhu experimentu bylo sledováno chování jednotlivých poloměrů zaoblení ostří za zvolených řezných podmínek. V průběhu obrábění zkušebního kvádrů z oceli P91 byly sledovány stejné parametry jako u pre-experimentu. Tedy opotřebení na nástroji, ve vybraných hladinách. Hladiny 10, 50 a 100, což odpovídá 6, 30 a 60 cm<sup>3</sup> objemu odebraného materiálu ze zkušebního kvádrů. Dále byly v těchto hladinách sledovány hodnoty drsnosti obrobeného povrchu. V průběhu řezného procesu, tedy ve všech odebraných hladinách pak bylo provedeno měření řezných sil a sledování efektivního řezného výkonu.

## 9 Zpracování a hodnocení naměřených dat

### 9.1 Hodnocení opotřebení nástroje



Obr. 40. Klasifikace hodnot opotřebení na nástroji [25]









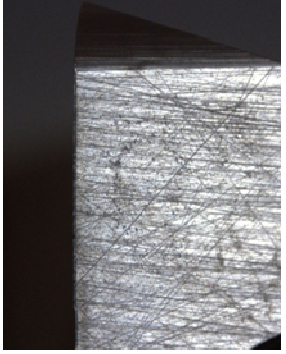

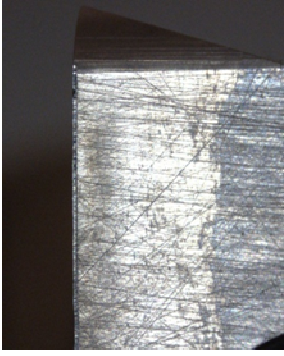
Obr. 41. Závislost opotřebení nástroje na hřbetě na objemu odebraného materiálu

Při porovnání opotřebení na hřbetě břitů nástroje (VBD) u všech tří poloměrů zaoblení ostří, je jasně patrný jev, který potvrzuje teorii popisovaný průběh opotřebení. A sice, že čím je poloměr zaoblení ostří menší, tím více a rychleji se opotřebovává. Tento jev se následně projevuje i při utváření povrchu obrobeneho materiálu. Méně opotřebovaný nástroj má za

následek lepší parametry drsnosti obrobeného povrchu. Stejně tak se potvrdil jev, že se zvětšujícím se poloměrem zaoblení ostří se zlepšuje i kvalita obrobeného povrchu.

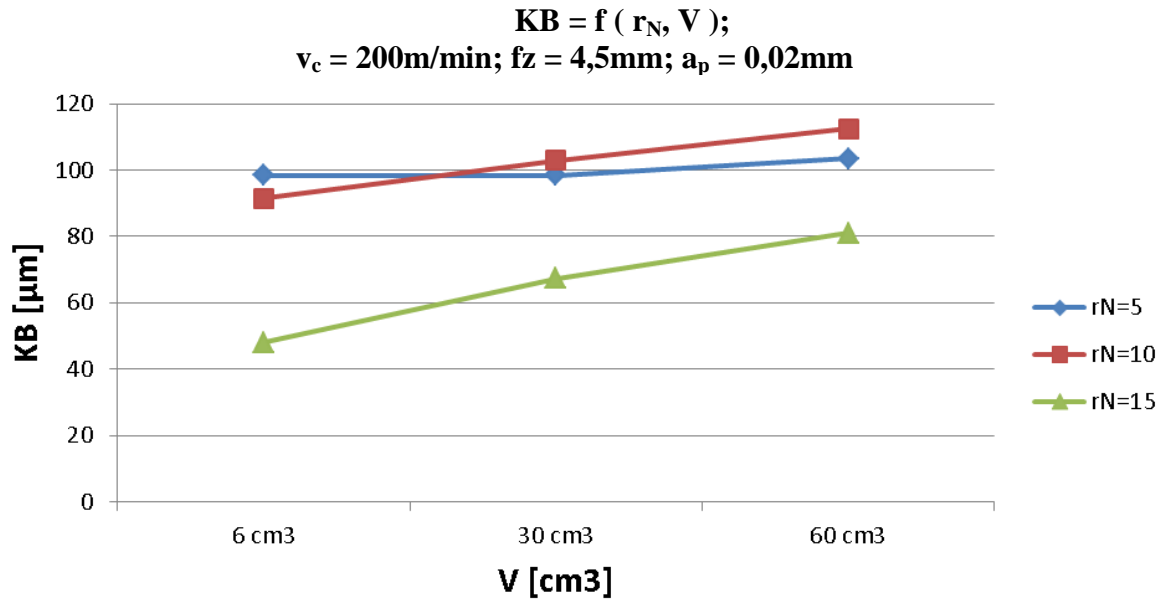
Měření opotřebení nástroje bylo dále provedeno i na čele nástroje. Z obrázků 41. a 43. vyplývá, že většího opotřebení bylo dosaženo na čele nástroje. Tento jev byl pravděpodobně způsoben velikostí hloubky řezu  $a_p$ . Toto zvýšené opotřebení nástroje na čele má pak zásadní vliv na zvýšení řezných sil, s nárůstem opotřebení.

**Porovnání opotřebení nástroje na hřbetě ve vybraných hladinách:**

Poloměr zaoblení ostří $r_N$ [ $\mu\text{m}$ ]	Objem odebraného materiálu V [cm <sup>3</sup> ]		
	$v_c = 200\text{m/min}; f_z = 4,5\text{mm}; a_p = 0,02\text{mm}$		
	6	30	60
$r_N = 5$			
$r_N = 10$			
$r_N = 15$			

**Obr. 42.** Porovnání opotřebení na hřbetě nástroje pro jednotlivé poloměry zaoblení ostří a vybrané objemy odebraného materiálu

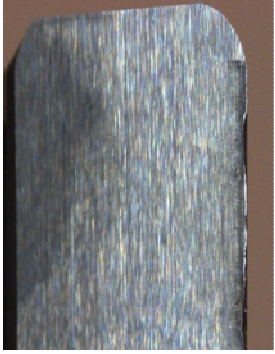
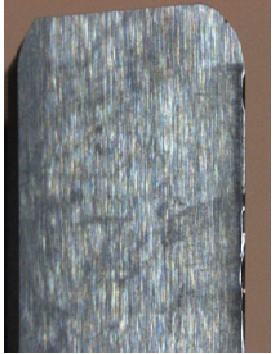
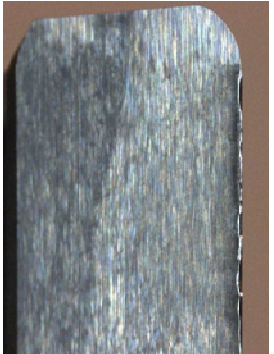
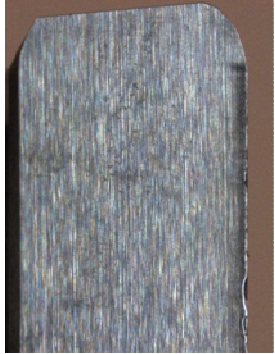
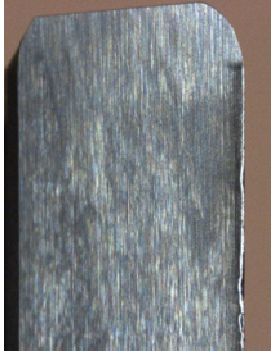

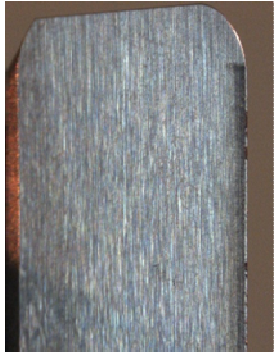






*Obr. 43. Závislost opotřebení nástroje na čele na objemu odebraného materiálu*

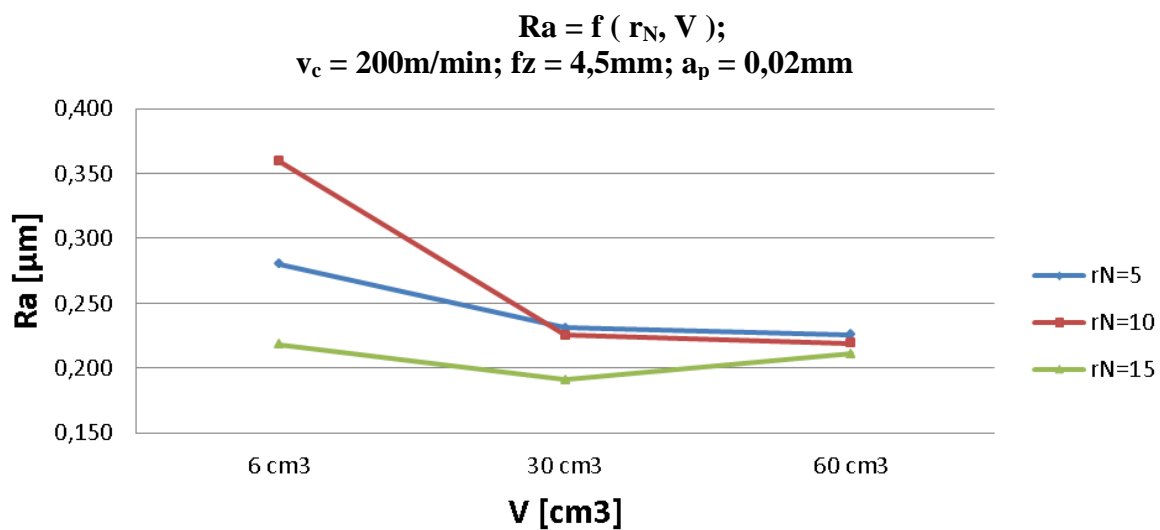
Opotřebení nástroje s poloměrem zaoblení ostří  $r_N = 15 \mu\text{m}$  dosahuje téměř stejných hodnot jako na hřbetě nástroje. Tento jev lze velice snadno vysvětlit tím, že větší poloměr zaoblení není tak závislý na této malé hloubce řezu, která byla zvolena pro experiment, jako menší poloměry zaoblení  $r_N = 5$  a  $10 \mu\text{m}$ . První bod dotyku nástroje s hranou materiálu u větších poloměrů zaoblení ostří při této malé hloubce řezu je pod hranicí inflexního bodu a dochází zde k horším podmínkám dělení atomů obráběného materiálu, než u menších poloměrů zaoblení ostří (viz obrázek 56).

**Porovnání opotřebení nástroje na čele ve vybraných hladinách:**

Poloměr zaoblení ostří $r_N$ [ $\mu\text{m}$ ]	Objem odebraného materiálu $V$ [ $\text{cm}^3$ ]		
	$v_c = 200\text{m/min}; f_z = 4,5\text{mm}; a_p = 0,02\text{mm}$		
	6	30	60
$r_N = 5$			
$r_N = 10$			
$r_N = 15$			

*Obr. 44. Porovnání opotřebení na čele nástroje pro jednotlivé poloměry zaoblení ostří a vybrané objemy odebraného materiálu*

## 9.2 Hodnocení drsnosti obrobeneho povrchu

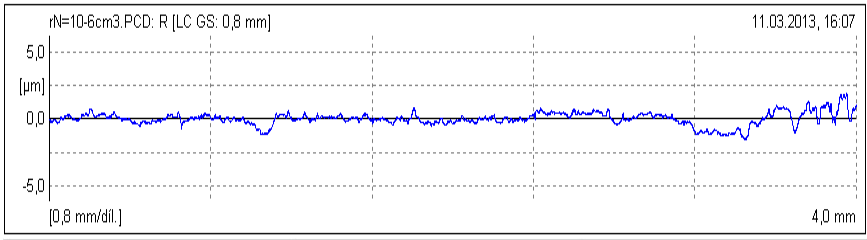
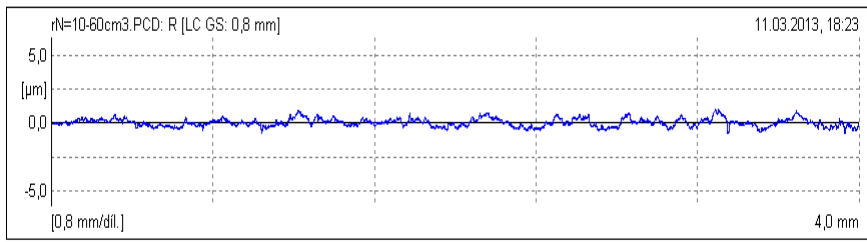
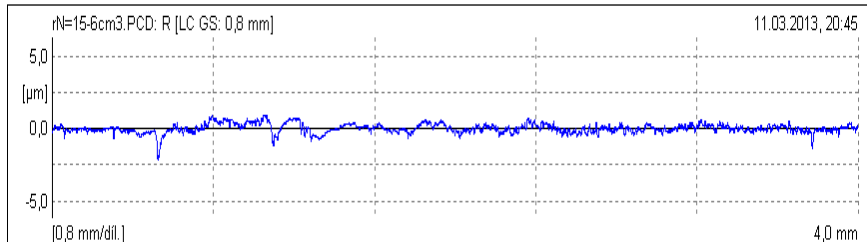
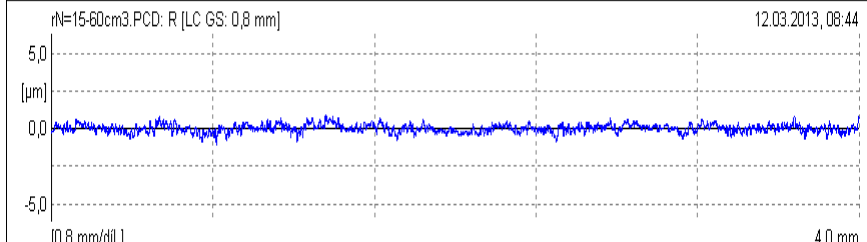


*Obr. 45. Závislost drsnosti obrobeneho povrchu Ra na objemu odebraného materiálu*

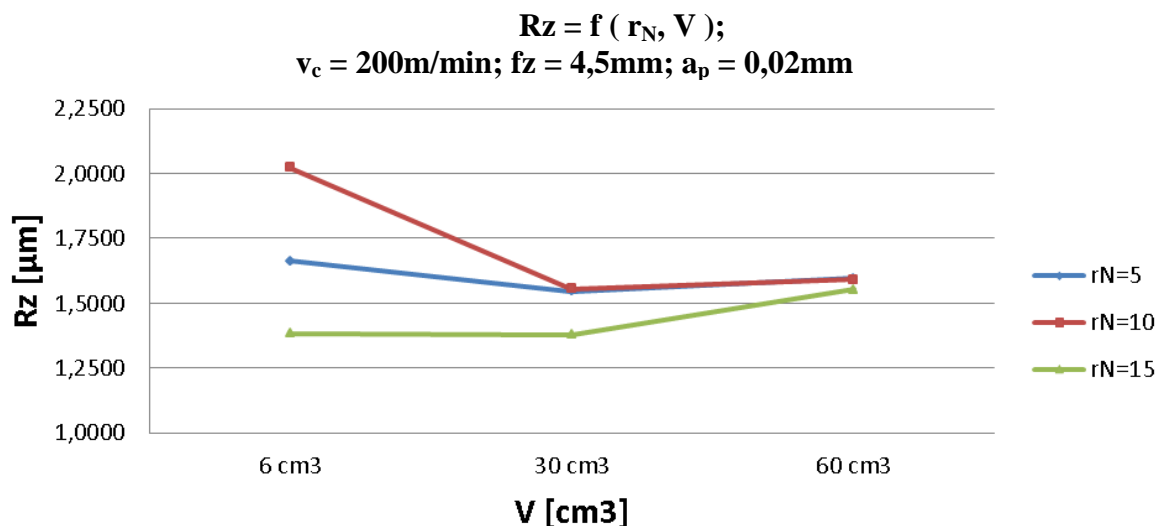
Hodnocení jednotlivých parametrů drsnosti obrobeneho povrchu přineslo zajímavý jev, který je protikladem teoretických poznatků. Menší poloměry zaoblení ostří projevívaly náhlý pokles drsnosti obrobeneho povrchu se zvětšujícím se objemem odebraného materiálu. Tedy začaly vykazovat zlepšující se parametry drsnosti obrobeneho povrchu. Podle teoretických souborů by se parametry drsnosti obrobeneho povrchu měly se zvětšujícím se objemem odebraného materiálu zhoršovat.

Tento teorií popíraný efekt je možné popsat tak, že opotřebení menších poloměrů zaoblení ostří při obrábění feriticko-martenzitických ocelí se přibližuje opotřebení větších poloměrů zaoblení ostří. Základem nové myšlenky je, že menší poloměry zaoblení ostří se při obrábění feriticko-martenzitických ocelí abrazivně opotřebovávají (při zvolené hloubce řezu 0,02mm – z experimentu) ke tvarům, které dosahuje poloměr zaoblení ostří  $r_N = 15 \mu\text{m}$ . Tím dochází k přibližování tvarů a stavů jednotlivých porovnávaných ostří, až dojde k téměř identickému vyrovnání na nástroji. Tento stav ovšem nemůže být úplně identický vlivem proměnlivosti struktury obrobeneho materiálu nebo průběhu opotřebování nástroje. Nic méně dochází k přibližování výsledků dosažené drsnosti obrobeneho povrchu materiálu.

**Porovnání profilů obrobeneho povrchu ve vybraných hladinách:**

Poloměr zaoblení ostří $r_N$ [ $\mu\text{m}$ ]	Objem odebraného materiálu $V$ [ $\text{cm}^3$ ]	Profil drsnosti obrobeneho povrchu																		
$r_N = 10$	6	 <table border="1"> <tr> <td><math>R_a</math></td> <td>0,359 <math>\mu\text{m}</math></td> <td><math>R_q</math></td> <td>0,476 <math>\mu\text{m}</math></td> <td><math>R_z</math></td> <td>2,00 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><math>R_{\text{max}}</math></td> <td>2,75 <math>\mu\text{m}</math></td> <td><math>R_p</math></td> <td>1,02 <math>\mu\text{m}</math></td> <td><math>R_{\text{pm}}</math></td> <td>1,02 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><math>R_t</math></td> <td>3,50 <math>\mu\text{m}</math></td> <td><math>R_{3z}</math></td> <td>1,33 <math>\mu\text{m}</math></td> <td><math>R_{\text{mrl}}(-1,0; 5,0)</math></td> <td>75,0 %</td> </tr> </table>	$R_a$	0,359 $\mu\text{m}$	$R_q$	0,476 $\mu\text{m}$	$R_z$	2,00 $\mu\text{m}$	$R_{\text{max}}$	2,75 $\mu\text{m}$	$R_p$	1,02 $\mu\text{m}$	$R_{\text{pm}}$	1,02 $\mu\text{m}$	$R_t$	3,50 $\mu\text{m}$	$R_{3z}$	1,33 $\mu\text{m}$	$R_{\text{mrl}}(-1,0; 5,0)$	75,0 %
	$R_a$	0,359 $\mu\text{m}$	$R_q$	0,476 $\mu\text{m}$	$R_z$	2,00 $\mu\text{m}$														
$R_{\text{max}}$	2,75 $\mu\text{m}$	$R_p$	1,02 $\mu\text{m}$	$R_{\text{pm}}$	1,02 $\mu\text{m}$															
$R_t$	3,50 $\mu\text{m}$	$R_{3z}$	1,33 $\mu\text{m}$	$R_{\text{mrl}}(-1,0; 5,0)$	75,0 %															
60	 <table border="1"> <tr> <td><math>R_a</math></td> <td>0,242 <math>\mu\text{m}</math></td> <td><math>R_q</math></td> <td>0,288 <math>\mu\text{m}</math></td> <td><math>R_z</math></td> <td>1,76 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><math>R_{\text{max}}</math></td> <td>2,58 <math>\mu\text{m}</math></td> <td><math>R_p</math></td> <td>0,99 <math>\mu\text{m}</math></td> <td><math>R_{\text{pm}}</math></td> <td>0,99 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><math>R_t</math></td> <td>2,92 <math>\mu\text{m}</math></td> <td><math>R_{3z}</math></td> <td>1,17 <math>\mu\text{m}</math></td> <td><math>R_{\text{mrl}}(-1,0; 5,0)</math></td> <td>98,0 %</td> </tr> </table>	$R_a$	0,242 $\mu\text{m}$	$R_q$	0,288 $\mu\text{m}$	$R_z$	1,76 $\mu\text{m}$	$R_{\text{max}}$	2,58 $\mu\text{m}$	$R_p$	0,99 $\mu\text{m}$	$R_{\text{pm}}$	0,99 $\mu\text{m}$	$R_t$	2,92 $\mu\text{m}$	$R_{3z}$	1,17 $\mu\text{m}$	$R_{\text{mrl}}(-1,0; 5,0)$	98,0 %	
$R_a$	0,242 $\mu\text{m}$	$R_q$	0,288 $\mu\text{m}$	$R_z$	1,76 $\mu\text{m}$															
$R_{\text{max}}$	2,58 $\mu\text{m}$	$R_p$	0,99 $\mu\text{m}$	$R_{\text{pm}}$	0,99 $\mu\text{m}$															
$R_t$	2,92 $\mu\text{m}$	$R_{3z}$	1,17 $\mu\text{m}$	$R_{\text{mrl}}(-1,0; 5,0)$	98,0 %															
$r_N = 15$	6	 <table border="1"> <tr> <td><math>R_a</math></td> <td>0,223 <math>\mu\text{m}</math></td> <td><math>R_q</math></td> <td>0,265 <math>\mu\text{m}</math></td> <td><math>R_z</math></td> <td>1,23 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><math>R_{\text{max}}</math></td> <td>1,58 <math>\mu\text{m}</math></td> <td><math>R_p</math></td> <td>0,65 <math>\mu\text{m}</math></td> <td><math>R_{\text{pm}}</math></td> <td>0,65 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><math>R_t</math></td> <td>1,67 <math>\mu\text{m}</math></td> <td><math>R_{3z}</math></td> <td>0,91 <math>\mu\text{m}</math></td> <td><math>R_{\text{mrl}}(-1,0; 5,0)</math></td> <td>97,0 %</td> </tr> </table>	$R_a$	0,223 $\mu\text{m}$	$R_q$	0,265 $\mu\text{m}$	$R_z$	1,23 $\mu\text{m}$	$R_{\text{max}}$	1,58 $\mu\text{m}$	$R_p$	0,65 $\mu\text{m}$	$R_{\text{pm}}$	0,65 $\mu\text{m}$	$R_t$	1,67 $\mu\text{m}$	$R_{3z}$	0,91 $\mu\text{m}$	$R_{\text{mrl}}(-1,0; 5,0)$	97,0 %
	$R_a$	0,223 $\mu\text{m}$	$R_q$	0,265 $\mu\text{m}$	$R_z$	1,23 $\mu\text{m}$														
$R_{\text{max}}$	1,58 $\mu\text{m}$	$R_p$	0,65 $\mu\text{m}$	$R_{\text{pm}}$	0,65 $\mu\text{m}$															
$R_t$	1,67 $\mu\text{m}$	$R_{3z}$	0,91 $\mu\text{m}$	$R_{\text{mrl}}(-1,0; 5,0)$	97,0 %															
60	 <table border="1"> <tr> <td><math>R_a</math></td> <td>0,219 <math>\mu\text{m}</math></td> <td><math>R_q</math></td> <td>0,272 <math>\mu\text{m}</math></td> <td><math>R_z</math></td> <td>1,47 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><math>R_{\text{max}}</math></td> <td>1,66 <math>\mu\text{m}</math></td> <td><math>R_p</math></td> <td>0,66 <math>\mu\text{m}</math></td> <td><math>R_{\text{pm}}</math></td> <td>0,66 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><math>R_t</math></td> <td>1,78 <math>\mu\text{m}</math></td> <td><math>R_{3z}</math></td> <td>1,14 <math>\mu\text{m}</math></td> <td><math>R_{\text{mrl}}(-1,0; 5,0)</math></td> <td>98,0 %</td> </tr> </table>	$R_a$	0,219 $\mu\text{m}$	$R_q$	0,272 $\mu\text{m}$	$R_z$	1,47 $\mu\text{m}$	$R_{\text{max}}$	1,66 $\mu\text{m}$	$R_p$	0,66 $\mu\text{m}$	$R_{\text{pm}}$	0,66 $\mu\text{m}$	$R_t$	1,78 $\mu\text{m}$	$R_{3z}$	1,14 $\mu\text{m}$	$R_{\text{mrl}}(-1,0; 5,0)$	98,0 %	
$R_a$	0,219 $\mu\text{m}$	$R_q$	0,272 $\mu\text{m}$	$R_z$	1,47 $\mu\text{m}$															
$R_{\text{max}}$	1,66 $\mu\text{m}$	$R_p$	0,66 $\mu\text{m}$	$R_{\text{pm}}$	0,66 $\mu\text{m}$															
$R_t$	1,78 $\mu\text{m}$	$R_{3z}$	1,14 $\mu\text{m}$	$R_{\text{mrl}}(-1,0; 5,0)$	98,0 %															

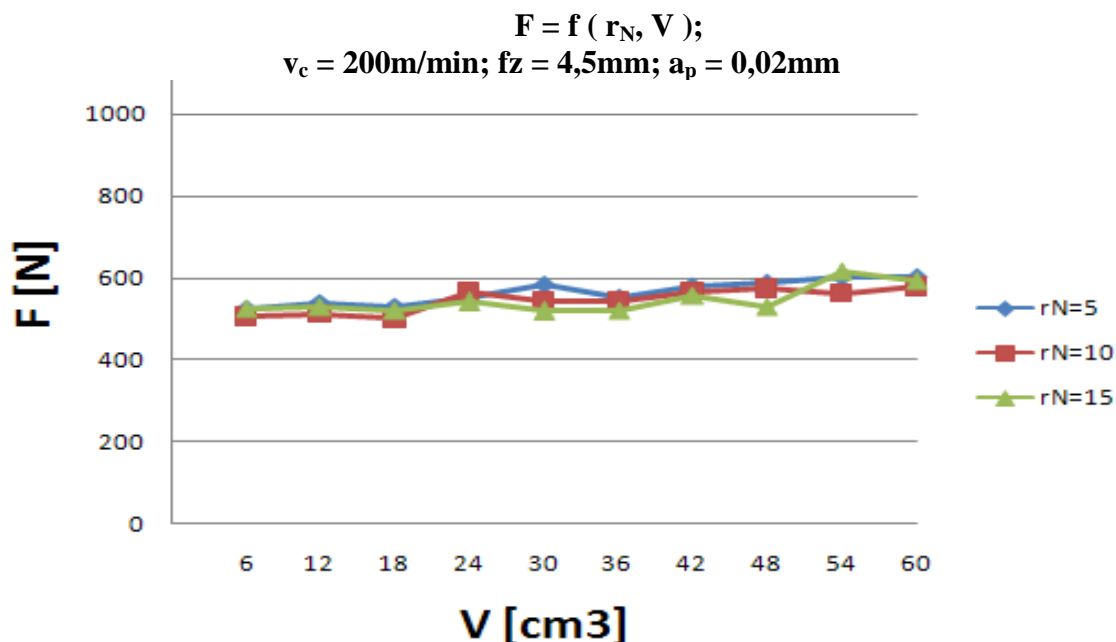
**Obř. 46.** Porovnání profilů obrobeneho povrchu pro vybrané poloměry zaoblení ostří a vybrané objemy odebraného materiálu



*Obr. 47. Závislost drsnosti obrobeného povrchu  $Rz$  na objemu odebraného materiálu*

Téměř identické jevy se vyskytovaly u všech sledovaných parametrů drsnosti obrobeného povrchu, jak dokazuje obrázek 47, na kterém je vyobrazena závislost parametru drsnosti  $Rz$  obrobeného povrchu na objemu odebraného materiálu.

### 9.3 Hodnocení řezných sil



*Obr. 48. Závislost celkového silového zatížení na objemu odebraného materiálu*

Celkové silové zatížení je popsáno silou  $F$  [N], která je složením sil, působících při řezném procesu. Tyto řezné síly při řezném procesu mají za následek vyvození takového napětí v obráběném materiálu, až dojde k oddělení třísky. Současně tato hodnota odpovídá míře odporu materiálu proti vnikání nástroje. A z toho vyplývá silný vliv stavu ostří na

celkové silové zatížení. Postupné obrábění obrobku sebou přináší (v ideálním případě) i postupné opotřebení řezného břítu. A s tímto opotřebením dochází k nárůstu celkového silového zatížení.

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2}$$

**Kde:**

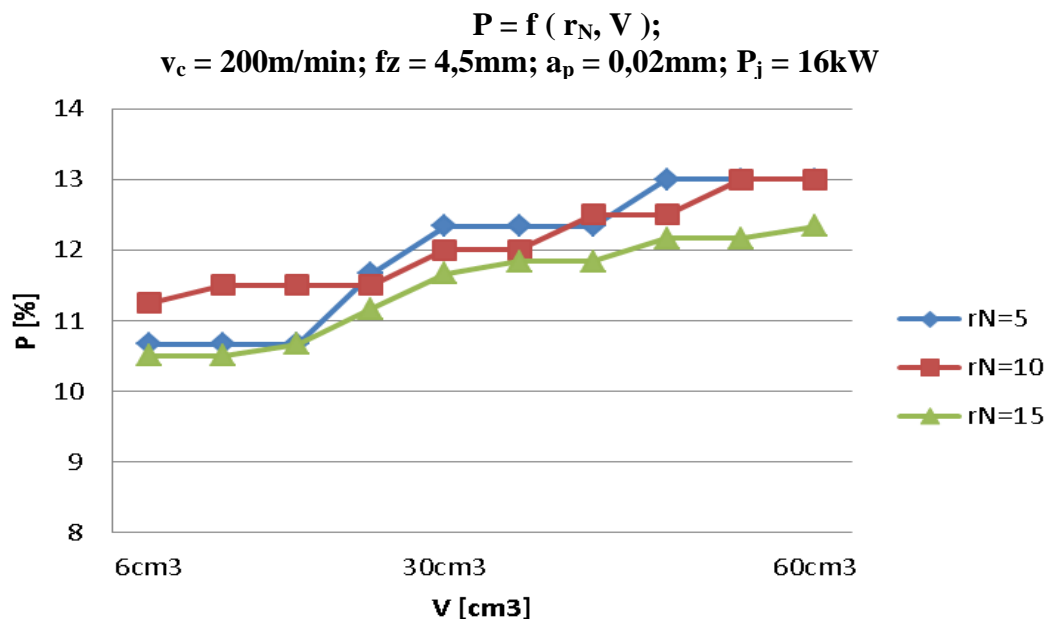
$F_c$  – složka řezné síly ve směru hlavního řezného pohyby

$F_p$  – složka řezné síly ve směru přísuvu

$F_f$  – složka řezné síly ve směru posuvu

V případě posuzování vlivu poloměru zaoblení ostří na celkovou řeznou sílu se potvrdily teoretické poznatky. Ty říkají, že se zvětšujícím se poloměrem zaoblení ostří dochází k nárůstu řezných sil. Tento fakt je způsoben tím, že nástroj s větším poloměrem zaoblení ostří hůře vniká do materiálu a tím dochází k nárůstu řezné síly. Větší poloměr zaoblení ostří má při vnikání do materiálu před nástrojem větší plochu v místě dotyku a tím i více atomů, které kladou odpor proti vniknutí nástroje do materiálu (viz obrázek 15 a 16, kapitola 3.2.2).

#### 9.4 Hodnocení efektivního řezného výkonu

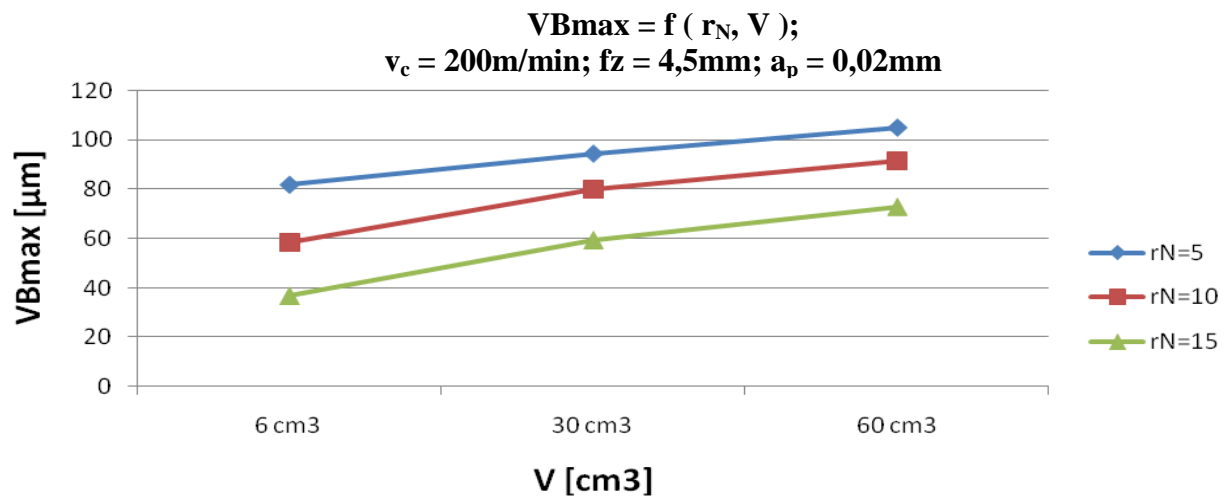


*Obr. 49. Závislost efektivního řezného výkonu na objemu odebraného materiálu*

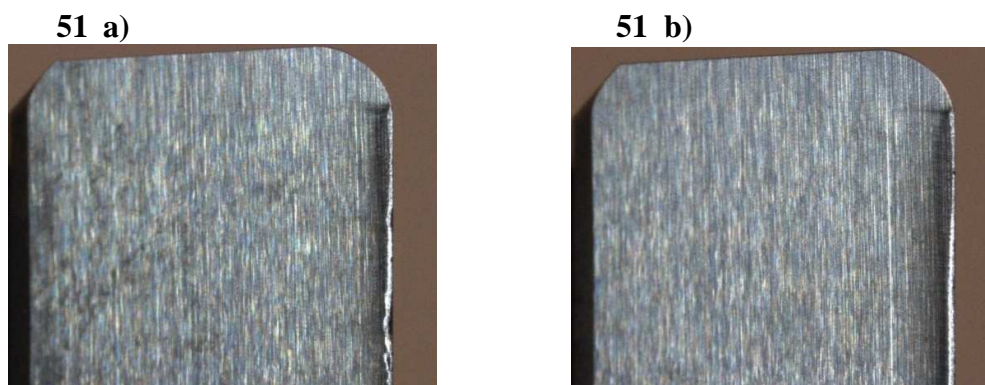
Vyjádření vlivu poloměru zaoblení ostří na efektivní řezný výkon stroje by bylo lépe čitelnější při větším rozsahu poloměrů zaoblení ostří. Z této závislosti je však velice dobře patrný jev, že s narůstajícím objemem odebraného materiálu dochází k nárůstu efektivního řezného výkonu. Tento nárůst je ale více vlivem opotřebení nástroje, než vlivem jednotlivých poloměrů zaoblení ostří.

## 9.5 Souhrnné hodnocení

### 9.5.1 Vliv opotřebení nástroje na průběh drsnosti obrobeneho povrchu



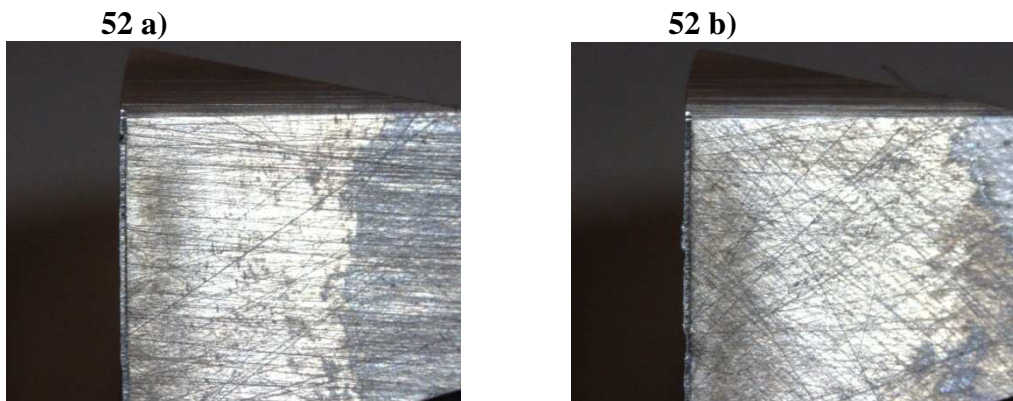
Obr. 50. Závislost opotřebení  $VB_{max}$  na množství objemu odebraného materiálu



Obr. 51. Tvar opotřebení nástroje na čele a)  $r_N = 10 \mu\text{m}$  ( $60\text{cm}^3$ )  
b)  $r_N = 15 \mu\text{m}$  ( $60\text{cm}^3$ )

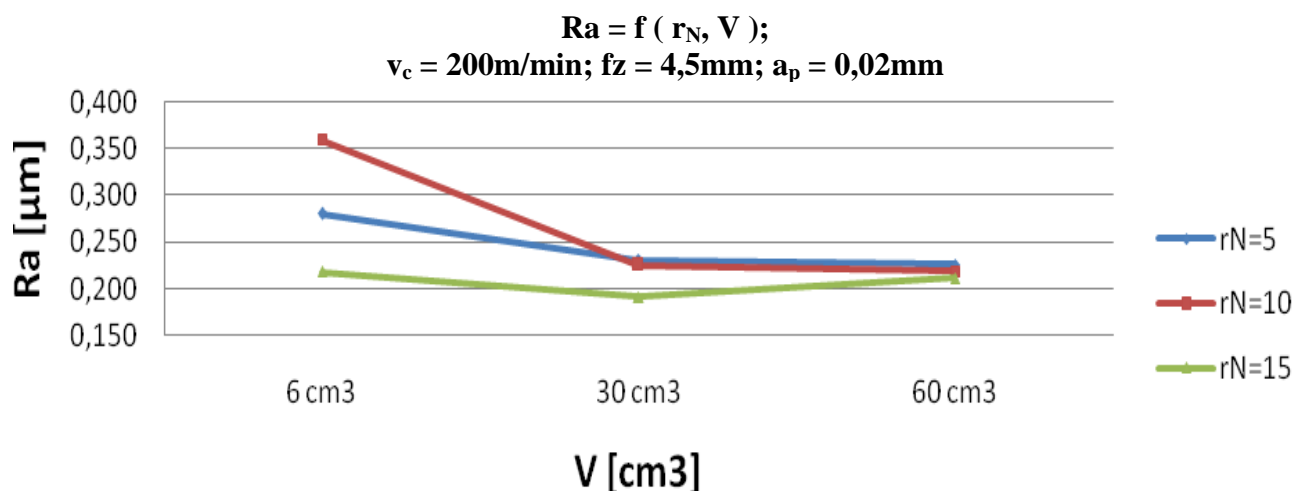
Porovnáním opotřebení řezné hrany na čele VBD s poloměrem zaoblení ostří  $r_N = 10 \mu\text{m}$  a  $r_N = 15 \mu\text{m}$  je patrné zvýšené opotřebení čela vyměnitelné břitové destičky s menším poloměrem zaoblení ostří. Tento jev lze vysvětlit následovně. Menší poloměr zaoblení ostří je „otupován“ a svým tvarem se s přibývajícím množstvím objemu odebraného materiálu přibližuje tvaru opotřebení ostří s poloměrem zaoblení ostří  $r_N = 15 \mu\text{m}$ . Vzhledem k průběhu opotřebení, kdy se tvary opotřebovaných ostří začínají podobat, je možné pozorovat, jak tento průběh opotřebení ostří ovlivňuje průběh drsnosti obrobeneho povrchu  $R_a$ .

Přibližující se tvar opotřebovaných ostří se zvětšujícím se množstvím odebraného materiálu má za následek, že drsnost  $R_a$  obrobeneho povrchu, vytvářená poloměrem zaoblení ostří  $r_N = 10 \mu\text{m}$ , se přibližuje hodnotám  $R_a$ , které byly vytvořeny poloměrem zaoblení ostří  $r_N = 15 \mu\text{m}$ .



Obr. 52. Tvar opotřebení nástroje na hřbetě a)  $r_N = 10 \mu\text{m}$  ( $60\text{cm}^3$ )  
b)  $r_N = 15 \mu\text{m}$  ( $60\text{cm}^3$ )

Důsledkem tohoto jevu lze pozorovat snižování hodnoty drsnosti obrobeného povrchu  $R_a$  s přibývajícím objemem odebraného materiálu pro poloměr zaoblení ostří  $r_N = 10 \mu\text{m}$ , což je teorií popíraný jev. Ale na obrázku 52 je pod mikroskopem přiblížený stav ostří na hřbetě nástroje (destičky), který má přímý vliv na utváření povrchu. V tomto případě vidíme porovnáni stavů ostří po dosažení  $60 \text{cm}^3$  objemu odebraného materiálu. Z porovnání obrázku je patrné, že po odebrání  $60\text{cm}^3$  objemu odebraného materiálu bylo dosaženo téměř totožného opotřebení na hřbetě. To mělo za následek přiblížení drsnosti obrobeného povrchu  $R_a$  (viz obrázek 53).



Obr. 53. Závislost  $R_a$  obrobeného povrchu na poloměru zaoblení ostří  $r_N$  a na množství objemu odebraného materiálu

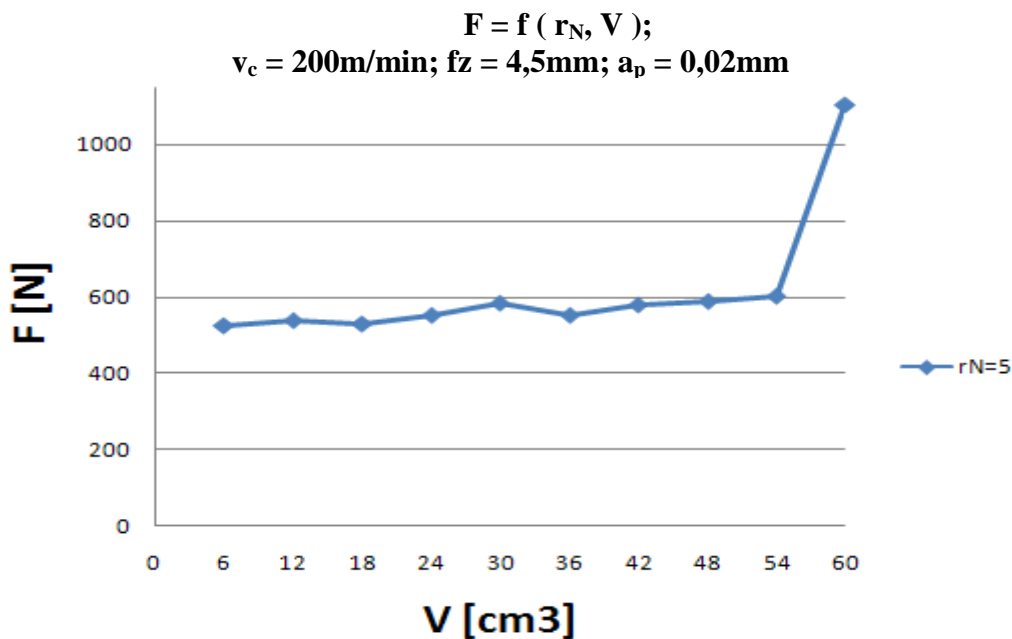
Náhodné jevy, které působí na řezný proces, je možné charakterizovat dvěma směry. Jedna oblast, která působí nahodile na řezný proces a přináší neočekávané jevy při obrábění, je oblast materiálová. Náhodný jev může být vyvolán nestejnorodostí obráběného materiálu, jeho příměsemi nebo změnami stavu materiálu v průběhu řezného procesu (zpevňování, změna charakteru vlivem teploty obrábění apod.).

Druhá zásadní oblast, která vnáší do řezného procesu neočekávané jevy je stav ostří nástroje. Právě stav ostří nástroje má přímý vliv na průběh řezného procesu. Jak již bylo naznačeno, stav ostří velmi výrazně ovlivňuje průběh drsnosti obrobeného povrchu. Což je



v případě dokončovacích operací velice zásadní, protože může dojít k nenávratnému poškození finálního výrobku.

Stav ostří ale také výrazně ovlivňuje i další parametry řezného procesu. Na obrázku 54 vidíme velmi výrazný vliv stavu ostří na průběh celkové řezné síly. Křivka, která naznačuje závislost celkové řezné síly na množství objemu odebraného materiálu, projevuje v místě selhání nástroje výrazný výkyv. Nadměrným opotřebením nástroje v tomto místě dojde k zásadní změně podmínek, za kterých nástroj vniká do materiálu. Vlivem selhání ostří se změní především geometrie v místě řezu. To má za následek zhoršení řezivosti řezného nástroje a tím dojde i k nárůstu celkové řezné síly.



Obr. 54. Závislost nárůstu celkové řezné síly při selhání řezné hrany (vyštípnutí)

Porovnání průběhu opotřebení $r_N = 5 \mu\text{m}$			
V [cm³]	6	30	60
Opotřebení na čele nástroje			
KB [ $\mu\text{m}$ ]	38	52	94
F [N]	523	585	1104

Obr. 55. Porovnání opotřebení na čele nástroje v závislosti na nárůstu celkové řezné síly

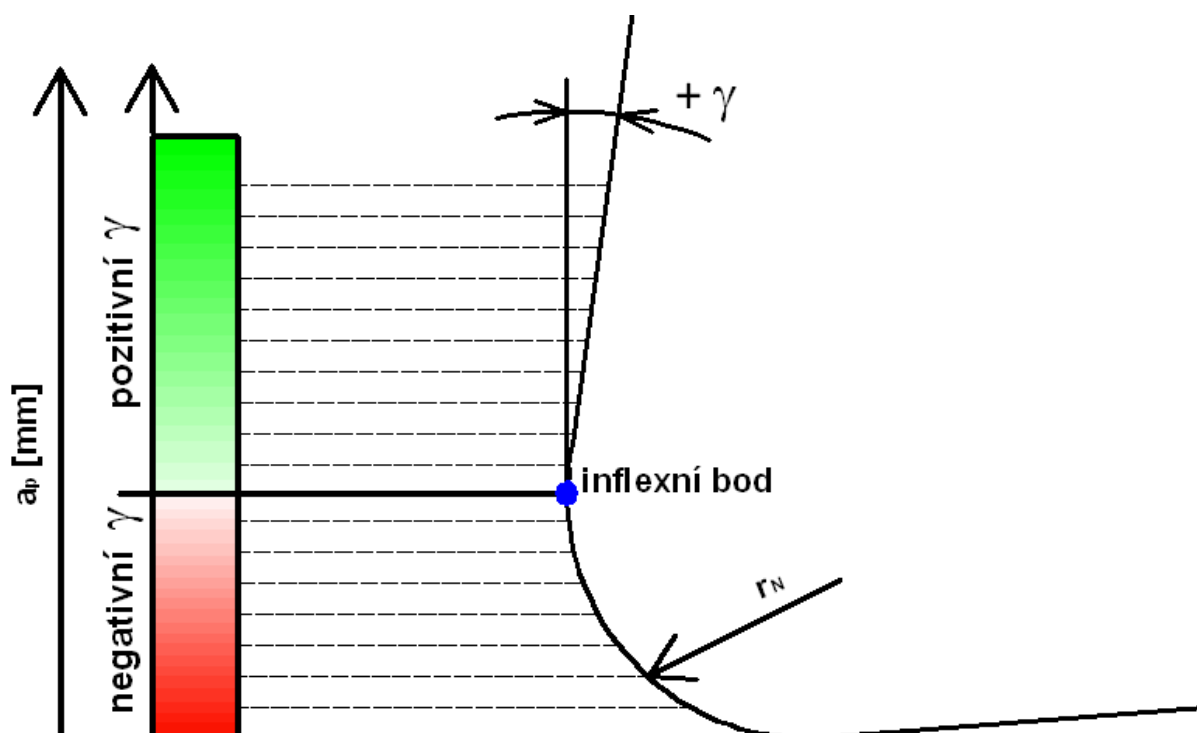
### 9.5.2 Závislost poloměru zaoblení ostří a hloubky řezu na průběh řezného procesu

$a_p$  - hloubka řezu

$\gamma$  - úhel čela

$r_N$  - poloměr zaoblení ostří

inflexní bod - přechod mezi poloměrem zaoblení ostří a rovinou čela nástroje



Obr. 56. Závislost velikosti poloměru zaoblení ostří na hloubce řezu

Jak již bylo řečeno v kapitole 4.2.3.2 (Vliv hloubky řezu na řezné síly), nejvíce hloubka řezu ovlivňuje právě nárůst řezných sil. To je způsobeno množstvím atomů obráběného materiálu, které se hromadí na čele břitu a kladou tak odpor proti oddělení. Odpor může být rozdílný podle druhu obráběného materiálu. Ale souhrnně lze říci, že se zvětšující se hloubkou řezu narůstá i celková řezná síla.

Zaměříme-li se na problematiku hlouběji, pak zjistíme, že velkým způsobem ovlivňuje průběh řezného procesu i geometrie použitého nástroje s ohledem na hloubku řezu. Při velmi malých hloubkách řezu, například když je frézování použito jako dokončovací operace, může nastat i velmi zásadní změna ve smyslu obrábění. Jak je naznačeno na obrázku 56, tak při použití nástroje je rozhodující i mikrogeometrie nástroje, jejíž velikost může ovlivnit právě smysl obrábění. Pokud je mikrogeometrie nástroje příliš výrazná (např. velký poloměr zaoblení ostří) vůči hloubce řezu, pak může dojít k přechodu od obrábění pozitivní geometrií k obrábění geometrií negativní. Na obrázku je tato část popsána červeným polem, které znázorňuje použití malé hloubky řezu a velkého poloměru zaoblení ostří. Přechodová hloubka řezu, která dělí řezný proces na obrábění pozitivní nebo negativní geometrií, je definována inflexním bodem (viz obrázek 56). Tento bod lze popsat jako místo na nástroji, kde poloměr zaoblení ostří přechází do roviny čela nástroje.

V závislosti na změně smyslu obrábění (tedy pokud je hloubka řezu v červeném nebo zeleném poli) se mění i styl odchodu třísky. Při obrábění pozitivní geometrií (zelené pole - obrázek 56) odchází převážná část třísky (v závislosti na hloubce řezu) po čele nástroje pryč z místa řezu. Menší část třísky je pak vtačována pod břit (v závislosti na geometrii nástroje) a tvoří tak deformační zpevnění obráběného povrchu. V případě obrábění negativní geometrií (červené pole - pokud je hloubka řezu menší než poloměr zaoblení ostří) je většina třísky vtačována pod břit a tím dochází spíše k tváření obráběného povrchu než k odběru třísky. Jen velmi malá část materiálu obrobku je oddělována od obrobku. K oddělení materiálu dojde až ve chvíli, kdy se „tvářený“ materiál nahromadí před nástrojem do takové výšky, že dojde k jeho oddělení. Tímto způsobem dochází k přerušovanému řezu v průběhu řezného procesu.

## 10 Diskuse výsledků

Prováděná experimentální činnost byla ve všech sledovaných parametrech řezného procesu porovnávána s teoretickými poznatky. Teoretické poznatky, které byly využity pro porovnávání, byly seskupovány postupným rozбором současného stavu a současně podle vztahů, potřebných pro popis řezného procesu. Jako hlavní parametry pro posuzování řezného procesu v tomto případě byly zvoleny: opotřebenění nástroje v průběhu řezného procesu vlivem změn řezné rychlosti, drsnost obrobeného povrchu vlivem změn mikrogeometrie nástroje (poloměrů zaoblení ostří), celková řezná síla posuzovaná s ohledem na změnu mikrogeometrie nástroje (poloměrů zaoblení ostří), ale i změnou mikrogeometrie opotřebením nástroje vlivem narůstajícího objemu odebraného materiálu.

Zaměříme-li se obecně na průběh opotřebenění nástrojů při obrábění ocelí, pak teoretické poznatky hovoří naprosto jasně. Nedojde-li v průběhu řezného procesu k neočekávanému jevu (například k selhání nástroje - vyštípnutí řezné hrany apod), pak opotřebenění nástroje postupně narůstá se zvětšujícím se objemem odebraného materiálu. Při obrábění feriticko-martenzitických ocelí, se tento jev potvrdil, jak můžeme prokázat například již v průběhu pre-experimentu (kapitola 6.1 obrázek 39). Zde je jasně patrný nárůst opotřebenění se zvětšujícím se objemem odebraného materiálu.

Porovnávání teoretických poznatků a poznatků získaných z experimentální činnosti v oblasti průběhů drsností obrobeného povrchu materiálu nám přineslo zajímavé zjištění. Teorie, která popisuje obecně obrábění ocelí, říká, že s narůstajícím časem obrábění dochází ke zhoršování parametrů drsnosti obrobeného povrchu. Tento jev je spojen s tím, že s narůstajícím časem obrábění dochází ke stále narůstajícímu úběru objemu odebraného materiálu. A tím dochází k postupnému opotřebenění („otupování“) nástroje, což má za následek zhoršení drsnosti obrobeného povrchu. V průběhu experimentu, prováděného na feriticko-martenzitické oceli, se ovšem objevil nečekaný jev. A sice, že se zvětšujícím se objemem odebraného materiálu se začala zlepšovat drsnost obrobeného povrchu, jak znázorňují obrázky 45. a 47.. A to hned pro dva ze tří zvolených poloměrů. V tomto případě se opotřebenění na nástrojích s poloměry zaoblení ostří  $r_N = 5$  a  $r_N = 10$   $\mu\text{m}$  dostalo do takového stádia, že se tvar opotřebenění přiblížil tvaru opotřebenění nástroje s poloměrem zaoblení ostří  $r_N = 15$   $\mu\text{m}$  (viz obrázek 52).

Další část řezného procesu, kterou velmi výrazně ovlivňuje opotřebení nástroje, je řezná síla. Teorie v tomto případě říká, že s narůstajícím časem obrábění (tedy se zvětšujícím se objemem odebraného materiálu a současně se zvětšujícím se opotřebením nástroje) dochází k nárůstu celkové řezné síly. Tento efekt se potvrdil i při experimentu, prováděném na feriticko-martenzitické oceli. Tento jev souvisí s vnikáním nástroje do obrobku, tedy s řezivostí. Vlivem opotřebení na nástroji dochází ke změnám řezných podmínek vlivem změny geometrie nástroje. A tím dojde i k nárůstu celkové řezné síly, jak je popsáno v kapitole 8.6.1 obrázek 54. Tato problematika se nám pak přenesla dále a je možné vlivem tohoto nárůstu celkové řezné síly pozorovat i navyšování efektivního řezného výkonu. Zvětšení celkové řezné síly se projeví nárůstem kroutícího momentu na vřetenu stroje a z tohoto nárůstu pak plyne i navyšování efektivního řezného výkonu.

Jednotlivé parametry řezného procesu se v průběhu obrábění výrazně mění. Ať už mluvíme o postupném otupování nástroje nebo o jiných změnách parametrů, které se projevují vlivem nárůstu času obrábění a množstvím objemu odebraného materiálu, všechny tyto změny se nám ve finálním stádiu odrazí na drsnosti obrobeného povrchu obrobku. Tedy rozhodujícím, konečným parametrem pro stanovení přijatelných mezí parametrů řezného procesu je zákazník. Ten rozhoduje o tom, co je přijatelné a co ne. Podobně jako jsou v praxi omezeny parametry řezného procesu, tak i parametry, které jsou sbírány experimentálními činnostmi, musí být nějakým způsobem omezeny. Tyto omezení se odvíjí od požadavků, za jakými je experiment prováděn. Pro potřeby naší experimentální činnosti byla zvolena následující kritéria:

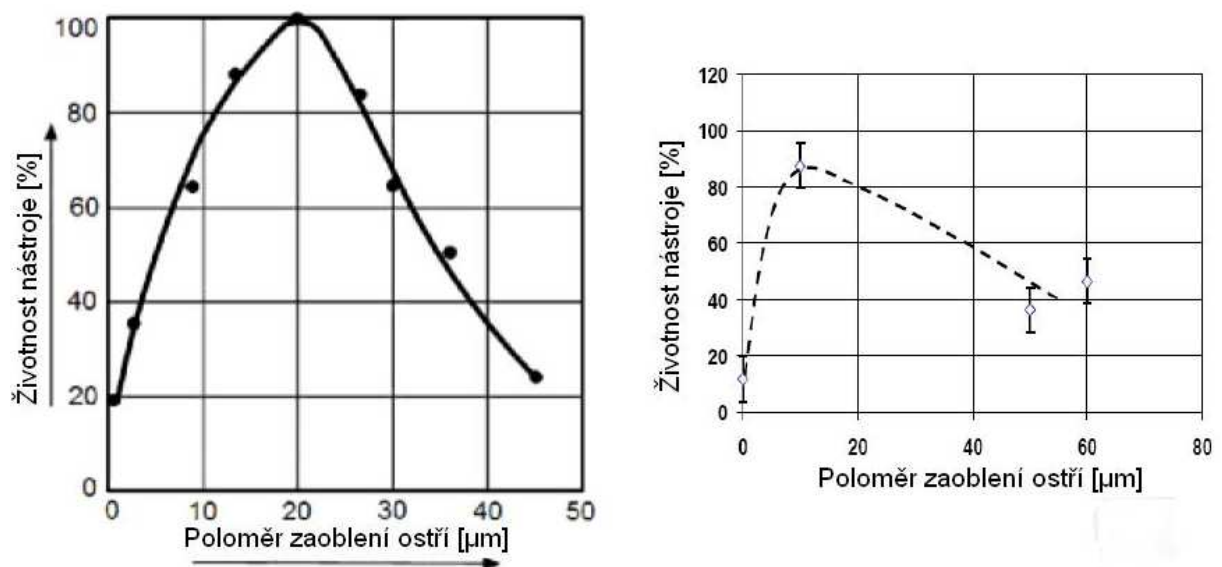
- Mez pro opotřebení na nástroji, které nesmí přesáhnout hodnotu opotřebení 0,15 mm (toto kritérium je tedy omezujícím parametrem pro nástroj)
- Parametr drsnosti povrchu (v tomto případě konkrétně parametr drsnosti povrchu  $R_a$ ), u kterého nesmí dojít k náhlému výraznému zhoršení (převážně projev nadměrného opotřebení) a současně tato hodnota nesmí přesáhnout 0,8  $\mu\text{m}$  (toto kritérium je tedy omezujícím parametrem pro obráběný povrch)
- Mez stanovující množství objemu odebraného materiálu, do které nesmí být překročeno žádné z výše uvedených kritérií. Toto kritérium bylo nastaveno tak, že překročení stanovených kritérií nesmí nastat před dosažením objemu odebraného materiálu 60  $\text{cm}^3$

Nejmenší z poloměrů zaoblení ostří, zvolených pro tento experiment,  $r_N = 5 \mu\text{m}$  projevoval překročení nastavených kritérií poměrně často s porovnáním vůči ostatním, větším poloměrům ( $r_N = 10$  a  $r_N = 15 \mu\text{m}$ ). Nejčastější kritérium, které bylo v tomto případě překračováno, bylo kritérium omezující maximální opotřebení nástroje. Ostří s poloměrem zaoblení ostří  $r_N = 5 \mu\text{m}$  dosahovalo největšího opotřebení na čele nástroje. Vlivem hromadění atomů obráběného materiálu na čele nástroje (viz obrázek 15.) s touto mikrogeometrií docházelo k poměrně výraznému abrazivnímu opotřebení ostří, což mělo za následek rychlejší otupování nástroje a s tím související nárůst celkové řezné síly. Zajímavý efekt, který přineslo výrazné opotřebení na čele nástroje, se projevil v průběhu drsnosti  $R_a$  obrobeného povrchu - viz kapitola 8.6, obrázek 49. Kde se zvyšujícím se objemem odebraného materiálu se parametr drsnosti  $R_a$  obrobeného povrchu zlepšoval.

Tento jev se projevil i v případě poloměru zaoblení ostří  $r_N = 10 \mu\text{m}$ . Zlepšování parametru drsnosti  $R_a$  obrobeného povrchu bylo také výrazné, jako v případě poloměru zaoblení ostří  $r_N = 5 \mu\text{m}$ . Postupné přiblížení parametru drsnosti  $R_a$  obrobeného povrchu k hodnotám, které vznikly při obrábění nástrojem s poloměrem zaoblení  $r_N = 15 \mu\text{m}$ , můžeme pozorovat na obrázku 53. Pozvolnější průběh zlepšování drsnosti obrobeného povrchu je možné zdůvodnit hodnotami opotřebení nástroje. Hodnoty opotřebení nástroje s poloměrem zaoblení ostří  $r_N = 10 \mu\text{m}$  dosahovaly menších hodnot, ale průběh byl až na zanedbatelné rozdíly stejný (viz kapitola 8.1, obrázek 40.)

Nejnižších hodnot opotřebení nástroje bylo dosahováno u nástroje s poloměrem zaoblení ostří  $r_N = 15 \mu\text{m}$ . Jak znázorňuje obrázek 40 v kapitole 8.1, opotřebení na čele nástroje mělo pro všechny tři zvolené poloměry zaoblení ostří stejný průběh, ale se zvětšujícím se poloměrem zaoblení ostří se hodnoty opotřebení snižovaly. Nejnižší hodnoty opotřebení nástroje s touto geometrií mají za následek i vyšší trvanlivost nástroje s touto geometrií oproti ostatní zvoleným polůměrům zaoblení ostří. Nejmenší hodnoty opotřebení měly také příznivý vliv na parametry drsnosti obrobeného povrchu, které byly v případě použití poloměru zaoblení  $r_N = 15 \mu\text{m}$  nejlepší.

Při porovnávání chování jednotlivých poloměru zaoblení ostří při řezném procesu je patrné, že nejlepší a současně požadovaných hodnot, které byly omezeny i nastavenými kritérii, vychází jako nejvhodnější poloměr zaoblení ostří  $r_N = 15 \mu\text{m}$  ze všech zvolených poloměru pro tento experiment, tím se potvrdil i poznatek vyplývající z teorie (viz obrázek 57). V případě menších poloměru zaoblení ostří je vysoké riziko nadměrného opotřebení, čímž se zkracuje životnost nástroje. Poloměr zaoblení ostří  $r_N = 15 \mu\text{m}$  byl tedy navržen pro následující experiment, který byl prováděn v rámci diplomové práce kolegy Bc. Jaroslava Krčmy, za účelem zjištění nejvhodnější přípravy ostří s tímto parametrem. Jak je naznačeno v kapitole 4.1.3 (Závislost trvanlivosti nástroje na poloměru zaoblení ostří), kde se postupným experimentováním za účelem zjišťování nových vlivů na trvanlivost nástroje se zjistilo, že trvanlivost ovlivňují nejen parametry mikrogeometrie, ale i způsob, jakým jich bylo docíleno.



Obr. 57. Závislost životnosti nástroje na velikosti poloměru zaoblení ostří [17]

## 11 Závěr

Na základě této práce vznikl příspěvek pro Soutěžní přehlídku studentských a doktorských prací FST 2013 [31]. Hlavním přínosem diplomové práce je rozšíření znalostí o problematice obrábění feriticko-martenzitických ocelí. Vznikl tak nový soubor informací o chování feriticko-martenzitické oceli P91 při obrábění. Sledování průběhu řezného procesu z hlediska vlivu mikrogeometrie nástroje přineslo další zákonitosti, které popisují vlivy mezi jednotlivými faktory ovlivňující řezný proces. Tyto závislosti poslouží pro doplnění již získaných informací o průběhu obrábění tohoto materiálu a jistě budou přínosem i pro stanovení dalších experimentů, za účelem dalšího prohlubování znalostí této problematiky.

Aplikace dosažených výsledků v praxi pak může přinést zefektivnění procesů obrábění, na základě informací získaných při experimentálním měření. Tím by výsledky této práce mohly významným způsobem usnadnit volbu nástrojů pro obrábění. Poznatky, získané z experimentální činnosti této práce, je možné také označit za ekonomickou úsporu pro společnosti, které začínají pracovat s tímto materiálem. Pro tyto společnosti budou poznatky představovat úsporu času při pozorování řezného procesu například za účelem dosažení vyšší efektivity výroby.

Vzhledem k tomu, že použití korozivzdorné, feriticko-martenzitické oceli P91 se v současné době rapidně rozšiřuje a její využití se plánuje i pro jaderné reaktory IV. generace, dá se předpokládat i zvýšení frekvence experimentů prováděných za účelem bližší specifikace řezného procesu při obrábění těchto materiálů. Tato práce bude tedy sloužit jako část databáze, shrnující poznatky o obrábění korozivzdorné, feriticko-martenzitické oceli P91.

## 12 Zdroje

- [1] - EURI INOX, *Vlastnosti korozivzdorných ocelí*. [cit.15.10.2012],  
Dostupné z [http://www.euro-inox.org/pdf/map/StainlessSteelProperties\\_CZ.pdf](http://www.euro-inox.org/pdf/map/StainlessSteelProperties_CZ.pdf),  
Lucembursko, © Euro Inox, 2002, ISBN 2-87997-082-2
- [2] - PACHOLKOVÁ, Š., PEŠA, J., *Možnosti výroby dvoufázových feriticko-martenzitických ocelí*. [cit.18.10.2012], Dostupné z  
[http://www.metal2012.com/files/proceedings/metal\\_00/papers/241.pdf](http://www.metal2012.com/files/proceedings/metal_00/papers/241.pdf),  
Ostrava, VZÚ, 2012.
- [3] - <http://www.kdynium.cz/cesky.asp?pid=p3d2d4>
- [4] - DŽUPON, M., BURÍKOVÁ, M., PARILÁK, L.: *Metodika přípravy dvojfázovej feriticko-martenzitickéj ocele mikrolegovanej V-Nb*. [cit.28.10.2012], Dostupné z  
<http://web.tuke.sk/fvtpo/journal/pdf08/1-str-44-48.pdf>, Košice, Ústav materiálového  
výskumu SAV, 2008.
- [5] - FILIPČÍK, J.: *Optimalizace výroby dílu pro letecký průmysl*.  
[Diplomová práce], Brno: VUT 2009
- [6] - HOSSEINI, V. S., VAHDATI, M.: *Modeling the effect of tool edge radius on contact zone in nanomachining*. Tehran, Iran, Elsevier B.V., 2012.
- [7] - HOCHMAN, A.: *Progresivní frézování Feriticko-martenzitické oceli P91*.  
[Diplomová práce], Plzeň: ZČU 2010
- [8] - <http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/oporakorozee4/k2.html>
- [9] - BOMBERA, M.: *Progresivní antikorozi kovové materiály*. [cit. 8.11.2012], Dostupné z  
[http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=28011](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28011),  
Brno: VUT 2010.
- [10] - PTÁČEK, Luděk. a kol. *Nauka o materiálu II*. 2. vyd. Brno:  
Akademické nakladatelství CERM, 2002. 391 s. ISBN 80-7204-248-3.
- [11] - [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=28011](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28011)
- [12] - [http://www.metal2012.com/files/proceedings/metal\\_00/papers/241.pdf](http://www.metal2012.com/files/proceedings/metal_00/papers/241.pdf)
- [13] - ŠRACHTA, P.: *Vliv parametrů vlečného omílání na kvalitu bříty rotačního nástroje*.  
[Diplomová práce], Plzeň: ZČU 2011
- [14] - ŠÍMA, M., JANKŮ, R., *Mechanická úprava monolitních nástrojů před PVD povlaky*.  
MM průmyslové spektrum, Duben, 2007.
- [15] - PILEČKOVÁ, Z.: *Vliv kvality bříty čelní válcové frézy na trvanlivost při obrábění nástrojové oceli*. [Diplomová práce], Plzeň: ZČU 2009
- [16] - [http://www.taegutec.cz/innotool/prirucka\\_obrazeni.php](http://www.taegutec.cz/innotool/prirucka_obrazeni.php)
- [17] - JANDA, Z.: *Studie problematiky frézování feriticko-martenzitické oceli P91*.  
[Disertační práce], Plzeň: ZČU 2012
- [18] - [http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general\\_turning/getting\\_started/turning\\_different\\_materials/hard\\_part\\_turning/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general_turning/getting_started/turning_different_materials/hard_part_turning/pages/default.aspx)
- [19] - MM spektrum: 2001 / 12, Kód článku: 011224, 12.12.2001 v rubrice Trendy, Strana 34,  
[cit. 16.12.2012], Dostupné z <http://www.mmspektrum.com/clanek/hladici-geometrie-reznych-britu.html>
- [20] - KEITH, J.: *Fundamentals of insert edge preparation*. Presented at  
Manufacturing'92—Cutting Tool Geometries, Kennametal, Inc., Chicago, IL,  
September 1992.
- [21] - RECH, J.: *Influence of cutting edge radius on the wear resistance of PM-HSS milling inserts*. Wear 259 (2005) 1168–1176 May 2005

- [22] - RAHMAN, M., TAY, A.A.O.: *Influence of cutting edge radius on the wear resistance of PM-HSS milling inserts*. Singapore, Singapore 119260, June 2006
- [23] - SHAO, H.: *Machinability study on 3%Co–12%Cr stainless steel in milling*. [cit. 10.1.2013], Dostupné z <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164807003171>  
China, Shanghai 200240, září 2007.
- [24] - <http://technik.ihned.cz/c1-57339360-obrabeni-laserem-princip-a-uziti-u-ocle-a-jinych-kovu>
- [25] - PŘIKRYL Z., MUSÍLKOVÁ R., *Teorie obrábění*. Praha, SNTL, 1982.
- [26] - TOMIS, J.: *Vliv velikosti zaoblení ostří na trvanlivost VBD*. [Bakalářská práce], Brno: VUT 2008
- [27] - [http://www.taegutec.cz/innotool/prirucka\\_obrabeni.php](http://www.taegutec.cz/innotool/prirucka_obrabeni.php)
- [28] - LUNDBAD, M. *Optimizing Titanium alloy machining by applying information gained from FE simulations*. AB Sandvik Coromant, Sweden. Dostupné z <http://www.ufc.com.cn/ufc/sandvic.pdf>
- [29] - BULÁNEK, J.: *Teorie třískového obrábění kovů*. [Bakalářská práce], Č. Budějovice: JČU 2008
- [30] - <http://www.mmspektrum.com/clanek/korozivzdorne-oceli-jako-konstrukcni-materialy-2-2-2.html>
- [31] - SCHUBERT J., ČESÁNEK Z., *Soutěžní přehlídka studentských a doktorských prací FST 2013*. Plzeň, Tiskové středisko ZČU, 2013, ISBN 978-80-261-0231-1