

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství  
Studijní zaměření: Strojírenská technologie – technologie obrábění

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Návrh ostření monolitních vrtáků pro obrábění austenitických ocelí

Autor: Bc. Lukáš MANDÍK  
Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří ČESÁNEK, Ph. D.  
Konzultant práce: doc. Ing. Jiří ČESÁNEK, Ph. D.

Akademický rok 2012/2013

## Prohlášení o autorství

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

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

**V Plzni dne: .....**

**.....  
podpis autora**

## **Poděkování**

Hlavní poděkování patří vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Česáňkovi, Ph. D. za vedení a důležité připomínky během řešení práce. Další velké díky patří Ing. Pavlovi Roudovi za podporu, důležité připomínky a pomoc s řešením problémů, jež při řešení diplomové práce nastaly.

Další poděkování patří Doc. Dr. Ing. Antonínu Křížovi a Ing. Tomášovi Niklovi za jejich ochotu a pomoc při řešení práce.

Tato diplomová práce vznikla za podpory projektů ESF OP VpK. Realizace projektu „Systém vzdělávání pro personální zabezpečení výzkumu a vývoje v oblasti moderního trendu povrchového inženýrství - integrity povrchu - CZ.1.07/2.3.00/20.0037“ umožnila konzultace s předními odborníky z oblasti povrchového inženýrství. Projekt „Posílení spolupráce mezi vysokými školami, výzkumnými ústavami a průmyslovými partnery v Plzeňském kraji - CZ.1.07/2.4.00/17.0052“ napomohl při propojení výstupů diplomové práce s aplikačním a akademickým prostředím. Diplomová práce byla realizována na základě řešeného studentského projektu SGS – 2012-044 „Aplikace progresivních vrstev na řezné nástroje s důrazem na integritu obrobeneho povrchu a řezné hrany“.

V neposlední řadě by autor rád poděkoval své rodině a přítelkyni za jejich podporu v průběhu celého studia a během psaní diplomové práce.

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Mandík		Jméno Lukáš	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	„Strojírenská technologie – technologie obrábění“ 2303T004			
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. ČESÁNEK, Ph.D.		Jméno Jiří	
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KTO			
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del>BAKALÁŘSKÁ</del>	<b>Nehodící se škrtněte</b>	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Návrh ostření monolitních vrtáků pro obrábění austenitických ocelí			

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

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	79	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	72	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	7
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Diplomová práce obsahuje souhrn informací ohledně problematiky obrábění austenitické korozivzdorné oceli monolitními šroubovitými vrtáky. Cílem práce je návrh ostření monolitního vrtáku, návrh možné povrchové úpravy a druh tenké vrstvy. Cílem experimentální části práce bude otestovat řezivost navrženého nástroje v porovnání s referenčním nástrojem. Důraz bude kladen především na trvanlivost navrženého nástroje.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	Šroubovitý vrták, slinutý karbid, austenitická ocel, makrogeometrie, mikrogeometrie, tenká vrstva, trvanlivost.

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Mandík	Name Lukáš
<b>FIELD OF STUDY</b>	„Department of Machining Technology“ 2303T004	
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. ČESÁNEK, Ph.D.	Name Jiří
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KTO	
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b> Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Design for monolithic drill bits sharpening for machining of austenitic steel	

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machine Design	<b>SUBMITTED IN</b>	2013
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

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

<b>TOTALLY</b>	79	<b>TEXT PART</b>	72	<b>GRAPHICAL PART</b>	7
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION</b>  <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The diploma thesis contains a summary of information regarding problems of machining of austenitic stainless steel by monolithic spiral drill bits. The aim of the diploma thesis is design for a monolithic drill bit, design of possible surface modification and design of a thin layer. The aim of the experimental part is cutting property test in comparison with a reference drill bit. The main aim of the designed drill bit is durability.
<b>KEY WORDS</b>	Spiral drill bit, cemented carbide, austenitic steel, macro-geometry, micro – geometry, thin layer, durability.

## Předmluva

Cílem této diplomové práce je navržení druhu a postupu broušení šroubovitého monolitního vrtáku k obrábění korozivzdorných austenitických ocelí a dále ověření jeho řezivosti v porovnání s referenčním nástrojem. V úvodu práce proběhne rozbor týkající se konkrétního typu nástroje a obráběného materiálu. Znalost obráběného materiálu a pochopení zákonitostí týkajících se obráběcího procesu má totiž stěžejní vliv na úspěšný návrh budoucího nástroje.

V druhé kapitole bude stručně zmapován současný stav broušení šroubovitých monolitních nástrojů pro daný typ materiálu. Protože úspěšný návrh moderních nástrojů nezáleží pouze na typu řezného materiálu a druhu makrogeometrie, bude třeba se zaměřit na možnosti zvyšování užitečných vlastností v podobě úprav mikrogeometrie s použitím depozice tenkých vrstev. V kapitole č. 3 se plynule přejde z rešeršní části práce k vlastnímu návrhu druhu broušení šroubovitého nástroje, druhu tenké vrstvy a úpravy povrchu nástroje. Návrh samotného broušení bude probíhat pomocí softwaru NUMROTO*Plus*.

Úspěšnost návrhu nástroje jako komplexního systému řezný materiál – tenká vrstva – úprava mikrogeometrie, bude třeba ověřit pomocí experimentu, kterým se zabývá kapitola 4. V následující kapitole se bude zabývat potenciálním ekonomickým přínosem řešení práce a nakonec proběhne sumarizace výsledků a návrh dalších směrů vývoje.

## Obsah

<b>Seznam použitých symbolů a zkratek .....</b>	<b>8</b>
<b>1. Úvod .....</b>	<b>10</b>
1.1 Nástroje .....	10
1.2 Šroubovitý vrták.....	14
1.3 Materiály používané ke konstrukci šroubovitých monolitních nástrojů.....	16
1.3.1 Rychlořezné nástrojové oceli.....	17
1.3.2 Slinuté karbidy.....	18
1.4 Vlastnosti obráběného materiálu a jeho obrobitelnost.....	19
1.4.1 Charakteristika austenitických korozivzdorných ocelí.....	19
1.4.2 Obrábění austenitických ocelí .....	21
1.4.3 Teplota řezání .....	24
1.4.4 Opotřebení nástrojů .....	25
1.4.5 Kvalita obrobených ploch.....	27
<b>2. Analýza současného stavu řešené problematiky .....</b>	<b>30</b>
2.1 Výroba šroubovitých vrtáků .....	30
2.2 Broušení hřbetních ploch šroubovitých vrtáků .....	32
2.2.1 Kuželový způsob .....	33
2.2.2 Rovinný způsob .....	34
2.3 Cesty ke zvyšování užitečných vlastností nástrojů .....	36
2.3.1 Druhy deponovaných vrstev .....	36
2.3.2 Druhy slinutých karbidů .....	38
2.4 Geometrie šroubovitých vrtáků pro obrábění austenitických ocelí .....	39
2.5 Úprava makrogeometrie šroubového vrtáku.....	41
2.5.1 Zkrácení příčného ostří .....	41
2.5.2 Tvar a úprava hlavního ostří .....	42
2.6 Úprava mikrogeometrie šroubovitých vrtáků .....	44
<b>3. Návrh broušení šroubovitého monolitního vrtáku včetně navržení úprav mikrogeometrie a typu tenké vrstvy .....</b>	<b>47</b>
3.1 Návrh konkrétních úhlů a úprav makrogeometrie .....	47
3.2 Návrh postupu broušení šroubovitého vrtáku .....	48
3.3 Návrh druhu povrchové úpravy a typu deponované tenké vrstvy .....	51
<b>4. Ověření zvýšení řezivosti nástroje s navrženou úpravou .....</b>	<b>52</b>
4.1 Podmínky a průběh experimentu .....	52
4.2 Vyhodnocení sledovaných veličin .....	55
4.2.1 Řezné síly a momenty.....	55
4.2.2 Opotřebení břitu.....	58
4.2.3 Jakost otvorů.....	62
4.2.4 Tvorba třísky.....	64
4.3 Diskuse výsledků .....	64
<b>5. Technicko ekonomické zhodnocení.....</b>	<b>66</b>
<b>6. Závěr .....</b>	<b>68</b>
<b>Zdroje.....</b>	<b>69</b>
<b>Seznam příloh.....</b>	<b>72</b>

## Seznam použitých symbolů a zkratek

Veličina	Jednotky	Název
$v_c$	[m.min <sup>-1</sup> ]	Řezná rychlost
$f$	[mm]	Posuv
$n$	[min <sup>-1</sup> ]	Otáčky
$v_f$	[mm.min <sup>-1</sup> ]	Posuvová rychlost
$F_f$	[N]	Posuvová (axiální) složka řezné síly
$F_p$	[N]	Přisunová (pasivní) složka řezné síly
$M_c$	[Nm]	Kroutící moment
$\alpha$	[°]	Úhel hlavního hřbetu
$\beta$	[°]	Úhel břitu
$\gamma$	[°]	Úhel čela
$\delta$	[°]	Úhel řezu
$\varepsilon$	[°]	Úhel špičky vrtáku
$\kappa_r$	[°]	Úhel nastavení hlavního ostří
$\omega$	[°]	Úhel stoupání šroubovitě drážky vrtáku
$\psi$	[°]	Úhel příčného ostří
$r_\varepsilon$	[mm]	Poloměr zaoblení špičky nástroje
$r_N$	[mm]	Poloměr zaoblení ostří nástroje
$h_z$	[mm]	Hloubka zpevněné vrstvy
$R_m$	[MPa]	Mez pevnosti materiálu v tahu
$K_{1C}$	[MPa×m <sup>1/2</sup> ]	Součinitel vrubové houževnatosti
$R_a$	[μm]	Střední aritmetickou drsnost povrchu
$R_z$	[μm]	Střední drsnost povrchu
$PC_{ref}$	[Kč]	Prodejní cena referenčního nástroje
$PC_{nav}$	[Kč]	Prodejní cena navrženého nástroje
$T_{ref}$	[počet otvorů]	Trvanlivost referenčního nástroje



$T_{nav}$	[počet otvorů]	Trvanlivost navrženého nástroje
$NN$	[Kč]	Náklady na nástroj
$z_v$	[Kč]	Počet výměn nástroje
$NN_T$	[Kč]	Náklady na nástroj po dobu jedné trvanlivosti
$FN$	[Kč]	Fixní náklady
$VN$	[Kč]	Variabilní náklady na otvor
$VBD$	-	Vyměnitelné břitové destičky
$NC$	-	Numerical Control
$HSS$	-	High Speed Steel
$SK$	-	Slinutý karbid
$NC$	-	Numerical Control
$CNC$	-	Computer Numerical Control
$CAM$	-	Computer Aided Manufacturing
$PVD$	-	Physical vapour deposition - vrstva nadeponovaná fyzikálním principem
$TiN$	-	Vrstva
$AlTiN$	-	Vrstva
$AlTiCN$	-	Vrstva
$AlTiCrN/TiSiCN$	-	Vrstva
$nACo$	-	Vrstva
$nACo^3$	-	Vrstva
$nACRo^3$	-	Vrstva
$LARC$	-	Lateral Rotating ARC-Cathodes - boční rotující oblouková katoda

## 1. Úvod

- zpracováno s pomocí [1]

Vrtání je technologickou operací, při které se obrábějí vnitřní rotační plochy, nejčastěji dvoubřitým nástrojem. Vrtání se provádí jak na specializovaných strojích – vrtačky (např. stolní, sloupové, stojanové, radiální), tak i na universálních strojích – hrotový universální soustruh, NC stroj. Co se týče historie, vrtání je považováno za jednu z nejstarších výrobních metod sloužící ke zhotovení či zvětšení požadovaného otvoru kruhového průřezu.

Nástroj vykonává hlavní řezný pohyb  $v_c$  (rotace kolem osy nástroje) i vedlejší pohyb (posuv  $f$  posunovou rychlostí  $v_f$  podél osy nástroje). Toto platí ve většině případů, jsou však možné i jiné varianty (vrtání na soustruzích – rotace obrobku). „Zvláštností vrtání i dalších, tzv. *osových operací* (mezi něž patří i vyhrubování, vystružování apod.) je to, že řezná rychlost je na obvodě nástroje nejvyšší a směrem k ose nástroje klesá k nule.“[1, str. 82] To má za následek, že například příčné ostří na špičce šroubovitého vrtáku díky nepříznivé geometrii obráběný materiál pouze jen plasticky deformuje, namísto aby jej obráběl, tzn. odebíral třísku. Z tohoto důvodu jsou nutné konstrukční úpravy břitu, jež budou uvedeny v průběhu práce.

### 1.1 Nástroje

- zpracováno s pomocí [1], [I], [II], [III], [X], [XII], [XIII]

Dle konstrukce požadovaného otvoru je třeba vybrat vhodný vrtací nástroj – vrták. Vrtáky jsou v základu děleny na monolitní nástroje a VBD nástroje. Monolitní nástroj je celý konstruován ze zvoleného řezného materiálu, kdežto VBD nástroje mají tělo vyrobené z konstrukční oceli vyšší pevnosti a řezný materiál je použit jen na výrobu měnitelných řezných segmentů. Ty mohou být koncipovány jako vyměnitelné břitové destičky, či jako vyměnitelné hlavičky. Zpravidla je nástrojů v monolitní formě použito pro menší průměry, zhruba 4 – 16 mm. Pro speciální použití, například obrábění v jemné mechanice či modelářství apod., se samozřejmě využívají i průměry mnohem menší. Vrtáky s vyměnitelnými destičkami jsou moderními vysocevýkonnými nástroji pro vrtání otvorů do plna v rozsahu 10 - 100 mm.



Obr. 1-1 – Monolitní nástroj převzato z [I]



Obr. 1-2 – Nástroj s VBD převzato z [II]

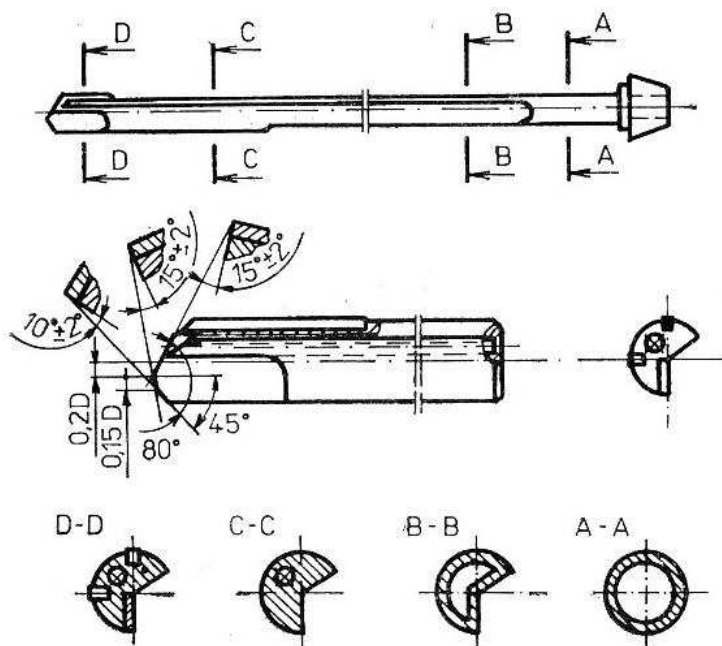


Obr. 1-3 - Vyměnitelná vrtací hlavička převzato z [III]

Je jasné, že hlavní výhoda spočívá v úspoře mnohdy drahého řezného materiálu. Pro zajištění bezproblémového odvodu třísek jsou v tělese nástroje vyfrézovány dvě šroubovitě či přímé drážky. „Protože vrták s vyměnitelnými destičkami není v díře veden, závisí přesnost díry na tuhosti nástroje. Z tohoto důvodu není možné používat tento vrták pro vrtání děr hlubších než 2 až 3D, kde D je průměr vrtané díry“ [1, str. 78]. Vysoký výkon nástrojů s VBD je dán 5 až 10krát vyššími řeznými rychlostmi.

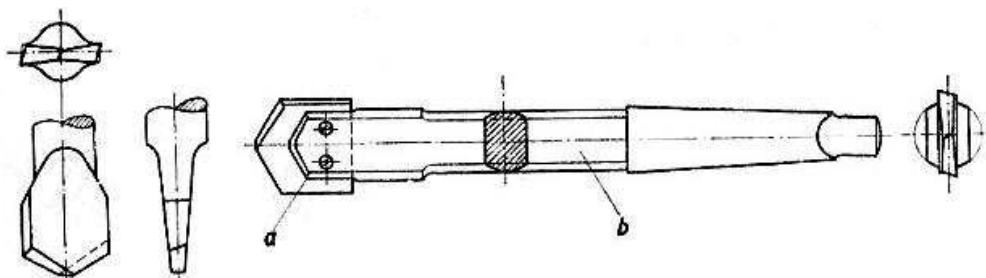
Dle tvaru, popřípadě konstrukce, se vrtáky dále dělí na *dělové*, *kopinaté*, *středící*, *vrtací hlavy a šroubovitě*. Šroubovitým vrtákům bude níže věnována samostatná kapitola 1.2, proto již o nich v této kapitole nebude zmínka.

**Dělové vrtáky.** Tento typ nástroje je využíván k vrtání hlubokých děr, které dosahují hloubek několika desetinásobků až stonásobků průměru vrtáku. Konstrukce těla a ostří zaručuje co nejlepší vedení v otvoru bez nežádoucího vybočení. „Dělové vrtáky jsou opatřeny vodícími lištami, umístěnými na obvodě tak, aby výsledná řezná síla procházela mezi nimi.“ [1, str. 76] Řezná část je konstruována buď v monolitním provedení či z vyměnitelných břitových destiček ze slinutého karbidu či polykrystalického diamantu. Držák tvoří jak u monolitního, tak i u VBD provedení trubka menšího průměru než je vrtaný otvor. Uvnitř trubky je otvor sloužící k vedení procesní kapaliny do místa řezu pod tlakem 2 – 4 MPa, což je nezbytné pro dokonalé vyplavování třísek z místa řezu drážkou na obvodu. Hlavní řezný pohyb (rotační) v tomto případě vykonává obrobek. Vrták vykonává pouze posuv ve směru osy nástroje.



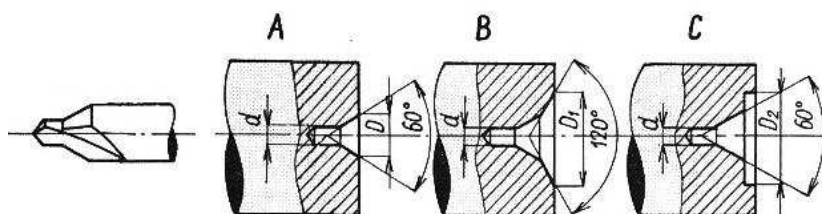
Obr. 1-4 - Dělový vrták převzato z [X]

**Kopinaté vrtáky.** Tyto vrtáky jsou nejstarším a nejjednodušším typem nástrojů určených k vrtání. Řezná část se skládá ze dvou hlavních břitů a jednoho příčného břítu. Úhel  $2\kappa_r$ , svírající navzájem hlavní ostří, je tím větší, čím roste tvrdost vrtaného materiálu. Interval tohoto úhlu se pohybuje od 90 do 146°. V dnešní době je řezná část nástroje konstruována jako vyměnitelná břitová destička. I v tomto případě je nutný dostatečný přívod procesní kapaliny k odvodu třísek z místa řezu. Trendem je použití tohoto nástroje v obrábění pomocí NC strojů, kdy je používán pro vrtání krátkých děr velkých průměrů.



Obr. 1-5 - Kopinatý vrták, a - řezná část, b - tělo vrtáku převzato z [X]

***Středící vrtáky.*** Středící vrtáky jsou nástroje určené k navrtání důlků různých tvarů sloužících pro podepření obrobků do hroty. Dále jsou také používány pro navrtání středících otvorů pro dodržení přesné polohy osy otvoru, který bude následně vytvořen šroubovitým vrtákem.



Obr. 1-6 - Obecný tvar středícího vrtáku pro tvary středících důlku A, B, C převzato z [X]



Obr. 1-7 - Středící vrták DIN 333 převzato z [XI]

***Vrtací hlavy.*** Tento typ nástrojů, který je možné aplikovat již na otvory od průměru 20 mm, je obvykle využíván k obrábění otvorů velkých průměrů. Rozlišují se tři základní druhy vrtacích hlav. U každé z nich jsou však použity pájené, či mechanicky upevněné destičky. První z metod je metoda **BTA**. Zde je procesní kapalina přiváděna tělem nástroje a poté prostorem mezi vrtákem a otvorem. Třísky jsou odváděny vnitřním proudem. Tlak procesní kapaliny se pohybuje mezi 4 – 10 MPa. Pro použití těchto nástrojů existují určité předpoklady, jako například absence vedení těla nástroje v otvoru, použití pro průměry do 200 mm či použití hlavně u soustružnických center či NC strojů.



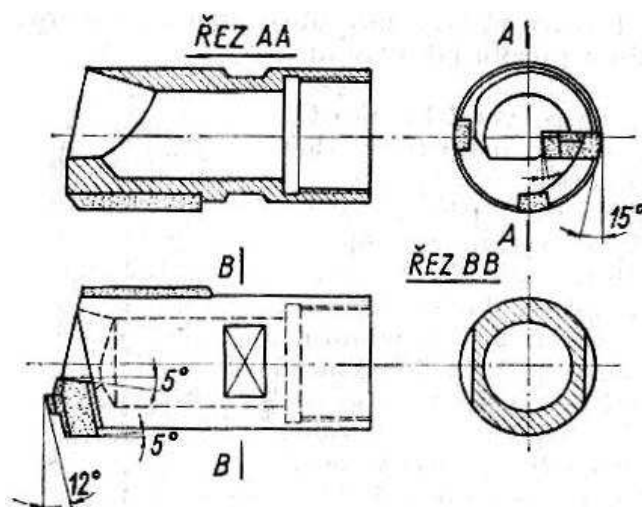
Obr. 1-8 - BTA systém do plna s VBD převzato z [XII]



Obr. 1-9 – Ejektorový systém do plna s VBD převzato z [XII]

U druhého typu nástrojů je chladicí kapalina pod tlakem 0,5 – 2 MPa přiváděna pouze vnějškem nástroje a třísky jsou v tomto případě odváděny vnitřkem vrtáků. Používání nástroje této konstrukce při výrobě otvorů se nazývá *ejektorová metoda*. Uplatnění těchto nástrojů je především u dlouhých otvorů u obrobků větších sérií s materiálem, který se charakterizuje špatnou tvorbou třísky.

„Vrtání do průměru 120 až 140 mm se obvykle provádí doplna, vrtání větších průměrů se provádí *trepanačními vrtáky* (tzv. na jádro). Trepanačními vrtáky se materiál odřezává pouze v mezikruží šířky 20 až 50 mm.“ [1, str. 77] Zbylé jádro se postupně posouvá vnitřkem nástroje včetně třísek. Určení pro průměry až do 250 mm a délky otvorů až 10 m. Důležitým konstrukčním prvkem jsou vodítka na obrodu nástroje, které napomáhají vedení nástroje v otvoru a mají také určitý hladicí účinek, při kterém lze dosáhnout střední aritmetické drsnosti povrchu Ra až 1,6 μm a lepší.



Obr. 1-10 - Trepanační vrták převzato z [X]

Operace		Přesnost IT	Drsnost povrchu Ra [μm]
Vrtání	Šroubovitými vrtáky	11 až 14	6,3 až 50
	Při použití vrtacích pouzder	7 až 10	
	Kopinatými vrtáky	8	3,2
	Hlavňovými vrtáky	7	1,6
	Vrtacími hlavami	8	3,2 až 6,3
Zahlubování		11 až 12	6,3 až 12,5
Vyhrubování		10 až 11	3,2 až 6,3
Vystružování		6 až 8	0,8 až 1,6

Tabulka 1-1 - Dosahované přesnosti a drsnosti povrchu vrtacích operací v porovnání s dokončovacími převzato z [XIII]

## 1.2 Šroubovitý vrták

- zpracováno s pomocí [2], [3]

Úkolem diplomové práce je podat návrh broušení vrtáku pro obrábění austenitických ocelí, u kterého bude kladen důraz na trvanlivost v závislosti na průběhu úhlů hřbetu u různých hřbetních ploch. Tato problematika bude dále podrobněji probrána a řešena v kapitole 3. Na navrhovaný nástroj jsou kladeny tyto následující požadavky:

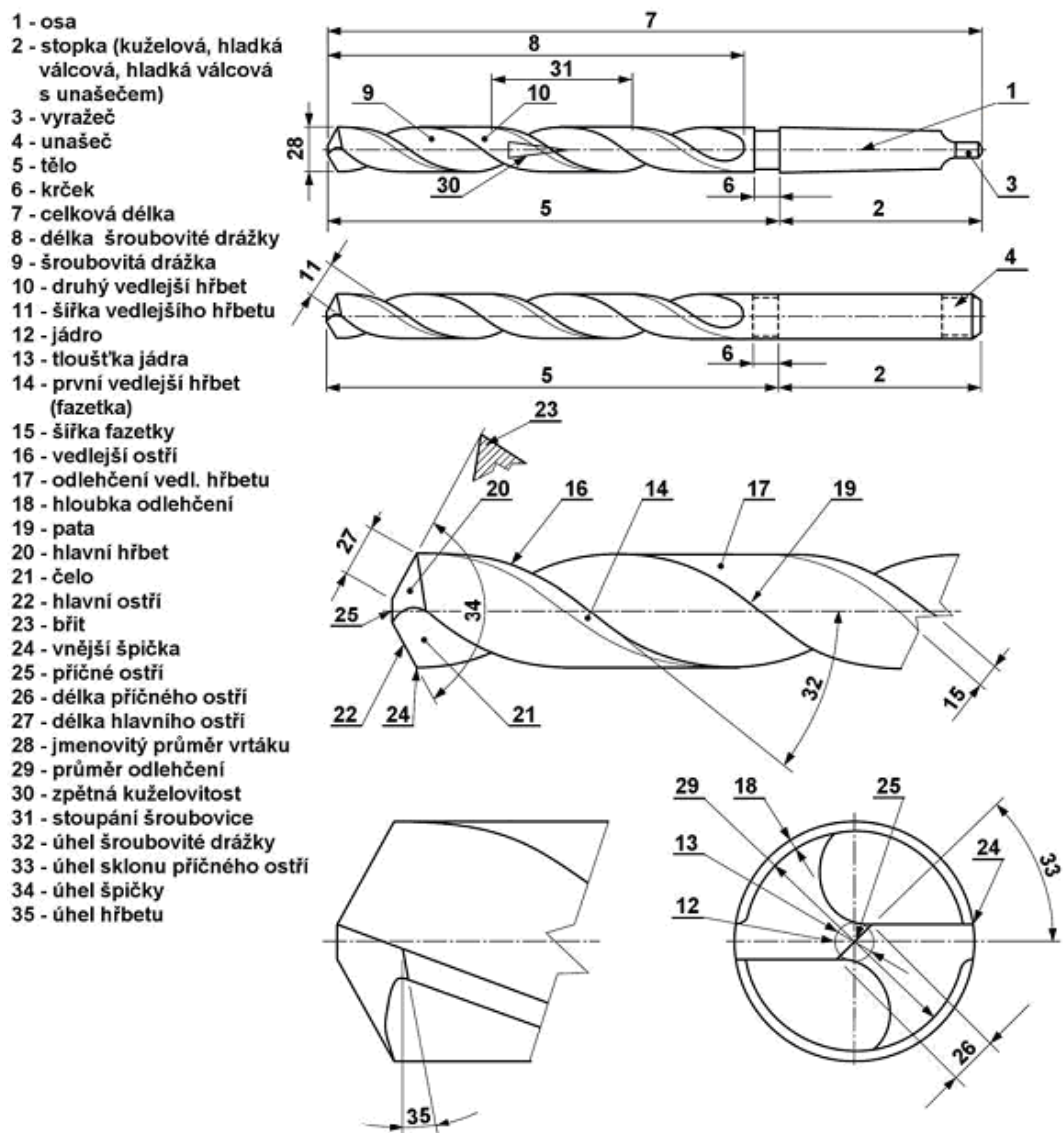
- **průměr nástroje 13 mm**
- **délka otvoru 8D**
- **monolitní SK nástroj**
- **pravořezný**
- **dvoubřítý nástroj**
- **válcová stopka**
- **vnitřní chlazení**

Jak se patrně z předchozí kapitoly 1.1, nástrojů pro vrtání je větší škála. S ohledem na získané informace během zpracování rešeršní části práce, bude pro obrábění zvolen šroubovitý vrták. Při průzkumu komerčně vyráběných vrtáků právě pro obrábění austenitických ocelí s výše uvedenými počátečními podmínkami bylo zjištěno, jsou používány výhradně šroubovité vrtáky s konstrukčním uspořádáním:

- **monolitní HSS vrták**
- **monolitní SK vrták**
- **vrták s vyměnitelnými destičkami nebo hlavičkami**

Z tohoto důvodu se již další průběh práce zaměřuje na šroubovité monolitní SK nástroje. Tento závěr vyplývá z upřesňujícího zadání diplomové práce s průnikem informací získaných z průzkumu trhu či konzultací přímo s výrobcem.

Šroubovité vrtáky, viz obrázek 1 – 11, jsou nejpoužívanější vrtací nástroje. V drtivě většině případů je jejich konstrukce provedena ve formě dvoubřitého nástroje se šroubovitou drážkou (9) s úhlem stoupání  $\omega$ , sloužící k odvodu třísek i za absence procesní kapaliny. Základ nástroje tvoří řezná (8) a upínací část (2). Na vrcholu řezné části nástroje se nachází špička. Špičku charakterizuje úhel  $\varepsilon$  (34). Slabinou šroubovitých vrtáků je především příčné ostří (25) vzniklé průnikem dvou hlavních hřbetních ploch (20). Příčné ostří spojuje dvě hlavní ostří (22), která jsou položena symetricky k ose vrtáku. Tento případ samozřejmě platí pro dvoubřítý nástroj. Jak již bylo řečeno v úvodu první kapitoly, řezná rychlost se se zmenšujícím se průměrem nástroje zmenšuje. V okolí špičky tedy spíše dochází k plastické deformaci. To nejspíše souvisí s nárůstem řezného odporu, jež roste se zmenšující řeznou rychlostí. Závislost však není monotónní vlivem tvorby stabilní váznuocí vrstvy na břitu nástroje – nárůstku. Svůj vliv zde také projevuje teplota v místě řezu či rychlost deformace, která zapříčiňuje změnu plasticity kovu. Tvar a velikost příčného ostří má v důsledku dopad na velikost složek řezné síly a tím na potřebný výkon pro řezání.



Obr. 1-11 - Základní parametry šroubovitého vrtáku převzato z [3]

Poměrně důležitým konstrukčním prvkem jsou válcové fazetky (14) na obvodě nástroje. Válcová faseta se táhne podél vedlejšího ostří (16) po celé délce řezné části nástroje. Zajišťuje vedení ve vrtaném otvoru. Z pomyslného válcového pláště vrtáku je s otvorem v kontaktu pouze uvedená válcová faseta, což zmenšuje výsledné tření mezi nástrojem a povrchem vyvrtané díry. To znamená, že jsou vedlejší hřbety odlehčeny na menší průměr a dále se tělo vrtáku směrem ke stopce mírně kuželovitě zužuje. Naproti tomu jádro (12) šroubovitého vrtáku, pohybující se v rozmezí  $0,25 \div 0,5 D$ , zajišťující zvýšení pevnosti proti porušení materiálu nástroje v krutu, popř. ve vzpěru, se směrem ke stopce rozšiřuje.

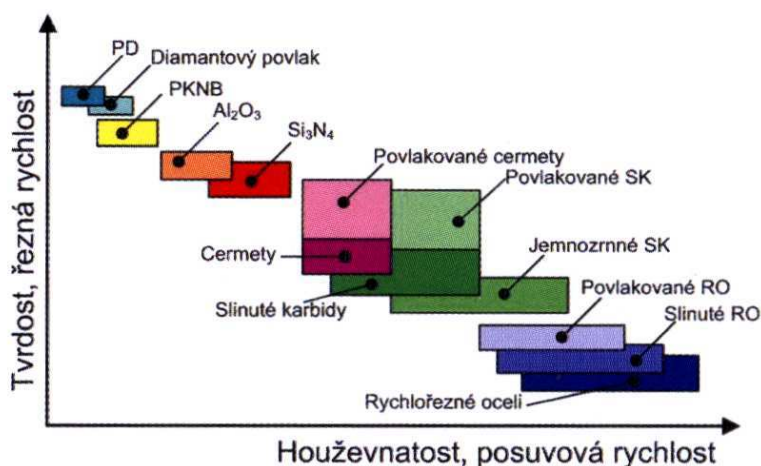
„Monolitní nástroje se nejčastěji vyrábí v průměrech 2,5 až 25 mm s rozsahem vrtaných délek až do 15D. Některé typy umožňují vrtat až do hloubky 30D.“ [2, str. 5] Je jasné, že čím delší otvor se bude vyrábět, tím horší přesnosti obrobeneho povrchu se bude dosahovat. Běžně se tato přesnost pohybuje mezi IT 7 – 9.



### 1.3 Materiály používané ke konstrukci šroubovitých monolitních nástrojů

- zpracováno s pomocí [5]

Vlastnosti materiálu, ze kterého je nástroj konstruován, se nemalou měrou promítají v celkové produktivitě a hospodárnosti výroby. Výsledné vlastnosti řezných materiálů, jako je řezivost či trvanlivost, se modifikují například jejich chemickým složením, tepelným zpracováním, přítomností depozice či celkovým způsobem výroby (odlévání, slinování). Jak je vidět z obrázku 1 – 12, existuje široká škála řezných materiálů, jež každý může mít dále své rozdělení do několika různých druhů a modifikací.



Obr. 1-12 - Houževnatost různých řezných materiálů převzato z [5]

Jak bylo řečeno v předchozí kapitole, práce se bude zaměřovat na šroubovitě monolitní SK nástroje. Pro možné srovnání vlastností slinutého karbidu s jiným materiálem zde bude stručně popsán další nejčastěji používaný materiál k obrábění austenitických ocelí – rychlořezná nástrojová ocel. V následujících dvou kapitolách budou uvedeny obecné vlastnosti těchto konstrukčních materiálů. O konkrétně používaných SK materiálech pro výrobu monolitních nástrojů a o možnostech zvyšování jejich užitečných vlastností, tedy o možnostech depozice tenkých vrstev, bude řeč v kapitole 2.3. Dále je třeba uvést, některé základní požadavky kladené na řezný materiál:

- **dostatečná houževnatost – odolnost proti šíření trhlin**
- **dostatečná tvrdost, tvrdost za tepla a pevnost**
- **stálost rozměrů**
- **odolnost proti adheznímu, brusnému, difúznímu a chemickému otěru**
- **dostatečná tepelná vodivost – nesmí docházet ke koncentraci tepla u řezné hrany**
- **odolnost vůči tepelnému šoku**

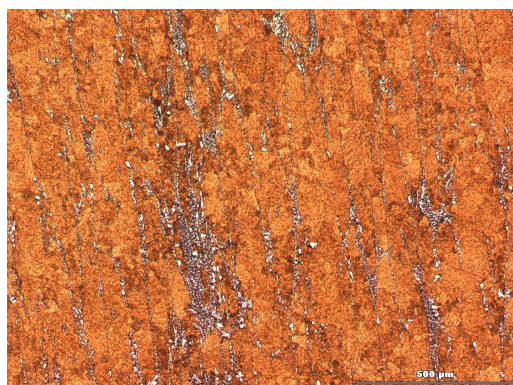


### 1.3.1 Rychlořezné nástrojové oceli

- zpracováno s pomocí [5], [6]

Rychlořezné nástrojové oceli jsou vysoce výkonnými materiály používané k výrobě řezných nástrojů a dále nástrojů k tváření za studena, patřící do samostatné skupiny vysokolegovaných nástrojových ocelí. Rozdíl mezi těmito oceli a ostatními legovanými nástrojovými oceli je v tepelném zpracování a hlavně chemickém složení. Nejčastějším tepelným zpracováním je zušlechťování, tedy zakalení s následným popuštěním, po kterém má ocel vysokou tvrdost i při teplotách kolem 600 °C, dostatečnou houževnatost, odolnost proti otěru a odolnost proti popuštění. „Hlavními legovacími prvky jsou W, Cr, V, Mo, Co. Nejpoužívanější je ocel 19 824 (Poldi Maximum Speciál). Má 0,7 % C, 18 % W, 4,3 % Cr a 1,4 % V.“ [6, str. 165] Obsah kobaltu u nejvíce namáhaných ocelí se pohybuje mezi 5 až 11,5 %. Toto složení odpovídá skupině tvářených ocelí. Nástroje s litou strukturou, které spadají do skupiny ocelí na odlitky, mají lepší řezivost za cenu nižší houževnatosti než tvářené struktury. Klasickým zástupcem je například ocel ČSN 42 2992 obsahující hlavně Cr, V, Mo a asi 10 % W.

Tvrdost zakalené a popuštěné struktury nástrojových ocelí závisí na obsahu uhlíku, zhruba do 0,8 %. Důležitá je také samozřejmě prokalitelnost související s obsahem Mn, Ni, Cr, Mo, W, která roste s obsahem těchto prvků. Poté již záleží na objemu a uspořádání primárních a hlavně jemných sekundárních karbidů. Primární karbidy jsou velké, proto je třeba je během tepelného zpracování rozpustit za vzniku jemnějších sekundárních karbidů. Prvky, které s uhlíkem tvoří karbidy jsou především wolfram, molybden, chrom a vanad, který s uhlíkem tvoří nejtvrďší karbid  $V_4C_3$ . „U nástrojů se uplatňují kombinovaná (statická a dynamická) mechanická namáhání v tahu, tlaku, ohybu a krutu. Proto je požadavek vysoké tvrdosti při poměrně nízké, ale vyhovující houževnatosti.“ [5, str. 10] Houževnatost lze zvýšit rovnoměrným rozmístěním karbidů a omezením přítomnosti vad a nežádoucích vměstků či nečistot. Problém může nastat při nevhodném postupu při tváření, kdy vzniká takzvaná karbidická řádkovitost, která snižuje houževnatost. Tento problém odpadá u nástrojových ocelí vyrobených práškovou metalurgií, kde je možné důkladným promísením jednotlivých složek slinovaného prášku řídit strukturu. Práškové rychlořezné oceli mají navíc vyšší teplotní stabilitu než oceli vyrobené klasickou metalurgií.



**Obr. 1-13 - Nežádoucí karbidická řádkovitost převzato z [5]**

Další důležitou vlastností je odolnost proti popuštění. „Vyšší stabilitu struktury nástrojových materiálů zajišťují legury Co, W, Mo a V. Čím vyšší je obsah karbidotvorných prvků v oceli, tím je i vyšší odolnost oceli vůči popuštění.“ [5, str. 11]

### 1.3.2 Slinuté karbidy

- zpracováno s pomocí [6], [7]

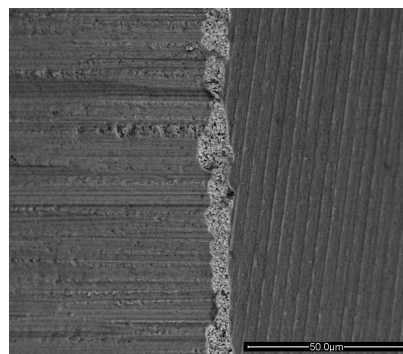
Slinuté karbidy patří mezi nejznámější materiály vyráběné technologií slinování kovů. K výrobě vrtacích nástrojů a řezných nástrojů potažmo se jich využívá jak ve formě monolitních celokarbidových nástrojů, tak ve formě vyměnitelných břitových destiček či řezných hlaviček. Slinuté karbidy (nedeponované i deponované) se dělí dle obráběného materiálu následovně:

- **P** – *značen modře* – *Obrábění konstrukčních nízkolegovaných ocelí (do 5% legur)*
- **M** – *značen žlutě* – *Obrábění korozivzdorných a litých ocelí*
- **K** – *značen červeně* – *Obrábění litin*
- **N** – *značen zeleně* – *Obrábění neželezných slitin a neželezných materiálů*
- **S** – *značen oranžově* – *Obrábění vysokoteplotních slitin (Fe, Co, Ni báze), titanu a Ti slitin*
- **H** – *značen šedě* – *Obrábění kalených ocelí a litin, tvrzených litin*
- 

Základní fází k výrobě slinutých karbidů je karbid wolframu (WC) ve formě zrn pojených kovovým kobaltovým pojivem. K modifikaci mechanických vlastností slinutého karbidu, z nichž nejdůležitější jsou tvrdost, pevnost v ohybu a lomová houževnatost, se volí různé velikosti zrn karbidu, obsah pojiva a obsah dalších složek (karbidů).

Velikost zrna se pohybuje od 0,2  $\mu\text{m}$  (nanozrno) přes 10  $\mu\text{m}$  (extra velké zrno). Obsah pojiva se pohybuje přibližně od 3 až do 20% objemu. Změna obsahu pojiva s průřezem může být cílená – požadovaná změna mechanických vlastností s průřezem. Jedním z případů nežádoucí změny obsahu kobaltového pojiva je nedodržení technologických parametrů při CVD depozici (zejména u TiCN depozici). V tomto případě nastává nárůst Co na úkor uhlíku a tím nežádoucí změna výsledných vlastností. Jak již bylo uvedeno, mechanické vlastnosti je možno měnit velikostí zrna a obsahem jednotlivých fází. Tak například, vysoké lomové houževnatosti se dosáhne (při relativním srovnání velikostí zrn a obsahu Co pojiva) volbou většího zrna a většího objemu Co pojiva. V tomto případě je trhlinka pojivem, nikoliv větším zrnem. Tedy opačný princip než šíření trhlin v ocelích, kdy se trhlinka může zastavit na hranici většího zrna. Velikost zrna je klíčová i v otázce výsledného stavu po broušení. „Čím je jemnější zrno, tím lze dosáhnout větší ostroty břitu. Např. pro obrábění hliníkových slitin se používá slinutý karbid s firemním označením (Ruebig) |K10UF.“ [7, str. 51]. Dostatečná vrubová houževnatost a pevnost v ohybu SK k obrábění korozivzdorných ocelí:

- velikost zrn od 0,5 až do 0,8  $\mu\text{m}$
- obsah Co pojiva 10 až 15 %



Obr. 1-14 - Řezná hrana po vybroušení  
převzato z [6]

Další karbidy, které se používají k výrobě slinutého karbidu jak k obecnému použití, tak k obrábění jsou karbidy titanu (TiC), tantalu (TaC), niobu (NbC) a karbid chromu (Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>). Pro příklad změny mechanických vlastností WC karbidu s Co pojivem se změnou obsahu legury, která tvoří s uhlíkem uvedené karbidy, jsou uvedeny dva příklady:

- **obrábění na čisto:** 6% Co, 10% Ti, 7,2% Ta, 2,4% Nb
  - Tvrdost dle Rockwella 93 HRA
  - Vrubová houževnatost 1378 MPa
- **přerušovaný řez:** 10,7% Co, 6,7% Ti, 5,4% Ta, 1,6% Nb
  - Tvrdost dle Rockwella 91 HRA
  - Vrubová houževnatost 2068 MPa

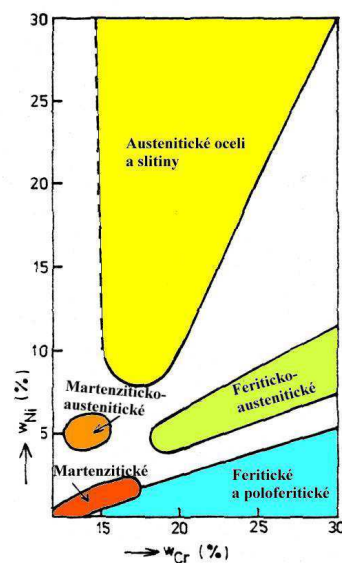
## 1.4 Vlastnosti obráběného materiálu a jeho obrobitelnost

### 1.4.1 Charakteristika austenitických korozivzdorných ocelí

- zpracováno s pomocí [3], [8], [9]

Podle ČSN normy jsou nerezové oceli řazeny do třídy 17. Dle chemického složení se dělí na oceli chromové, chromniklové a chrommanganové (korozivzdorné) a dále podle struktury, na oceli martenzitické, feritické, austenitické, austeniticko-feritické, martenziticko-feritické a disperzně zpevněné korozivzdorné. Disperzně zpevněnými korozivzdornými ocelmi se mají na mysli oceli, vzniklé modifikací austenitické oceli se základním složením 18% Cr a 10% Ni. Jsou to precipitačně zpevněné martenzitické a austenitické oceli. Rozpouštěcím žháním a následně umělým stárnutím (u každé z ocelí za rozdílných podmínek) došlo z přesycené základní matrice k vyloučení precipitátů legujících prvků, zejména Al, Ti, Cu, Nb, N.

Obsah chromu je v těchto ocelích důležitý, avšak korozivzdornost závisí na dalších legujících prvcích a jejich obsahovém množství. Obecně obsahují korozivzdorné oceli minimálně 12% chromu, aby byly zajištěny pasivační schopnosti oceli. Oceli obsahují také další legující prvky zlepšující v kombinaci s chromem korozní vlastnosti, např. nikl, molybden. Odolnost proti mezikrystalické korozi zvyšuje niob, titan. Přítomnost dusíku zvyšuje pevnost a korozivzdornost a přidání síry zlepšuje lepší obrobitelnost. S obsahem dalších legur se mění struktura korozivzdorných ocelí.



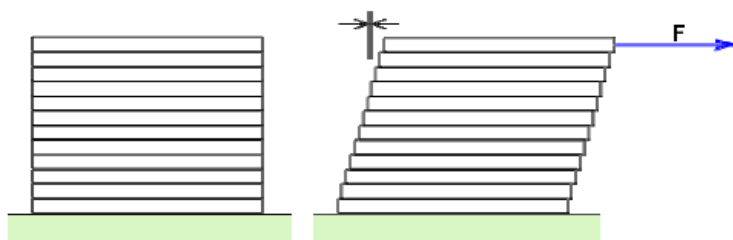
Obr. 1-15 - Vyznačení oblasti chemických složení korozivzdorných ocelí převzato z [8]

V tabulce níže jsou vidět některé mechanické a fyzikální vlastnosti austenitické oceli DIN 1.4541 v porovnání s konstrukční uhlíkovou ocelí ČSN 12 050.

Porovnání vlastností při pokojové teplotě		
DIN	1.1191	1.4541
ČSN	12 050	17 248
$R_{p0,2}$ [MP]	min. 325	min. 200
$R_m$ [MP]	630 - 850	500 - 720
mez smyku $\tau$ [MP]	460	186*
HB nekaleno	max 207	160
Tažnost [%]	17	40
Nárazová práce [J]	25	60
Tepelná vodivost [W/m.K]	47	15

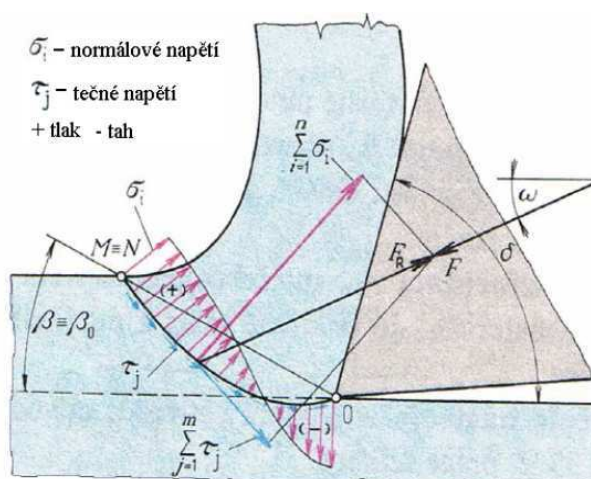
**Obr. 1-16 - Vlastnosti ocelí ČSN 12 050 a DIN 1.4541 převzato z [9]  
\*titanem nestabilizovaná austenitická ocel DIN 1.4301 ČSN 17 240**

Jak je z výše uvedené tabulky patrné, mez pevnosti ve smyku je u austenitické oceli cca 40% proti uhlíkové oceli.



**Obr. 1-17 - Namáhání na smyk převzato z [3]**

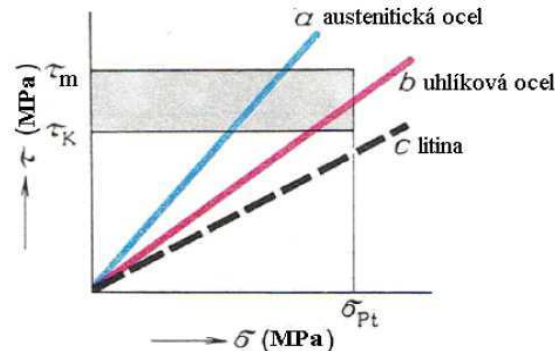
Pro austenitickou ocel je mez smykového napětí velmi nízká, tzn. že ocel bude velmi snadno podléhat smykovému napětí. Jestliže dojde k zatížení materiálu jakoukoliv vnější silou, vzniknou v materiálu tečná a normálová napětí viz obrázek 1 – 17.



**Obr. 1-18 - Průběh tahových a smykových napětí při řzném procesu převzato z [9]**

Čára MO představuje oblast s největším působištem napětí, převážně je zde tlakové napětí, až na oblast u ostří, kde působí normálně tahové napětí. Tečně na tuto čáru působí

tečné napětí. V místě O působí dohromady nejvyšší tahové a tečné napětí, tím vznikne nejvyšší redukované napětí. Z toho důvodu je v tomto místě první rozrušivá deformace. V místě, kde se mění tlakové napětí na tahové, působí pouze čisté tečné napětí. Jelikož v oblasti MNO působí tečné a normálové napětí, je zapotřebí u obrobku sledovat nejen mez pevnosti v tahu, ale také ve smyku.



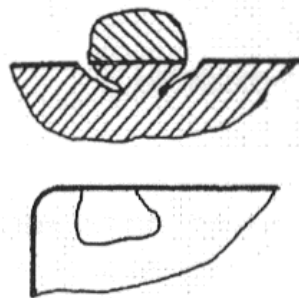
Obr. 1-19 - Vztah pevnosti v tahu a ve smyku při obrábění různých materiálů převzato z [9]

Namáhání odřezávaného materiálu "a" - tečné napětí v tomto případě dosáhne dříve meze kluzu  $\tau_k$  a meze pevnosti  $\tau_m$  než normálové napětí meze pevnosti v tahu  $\sigma_{Pt}$ . Tzn., že se materiál odřezávané vrstvy výrazně plasticky deformuje a poté odděluje. Namáhání odřezávaného materiálu "c" - pokud normálové napětí meze pevnosti v tahu dosáhne dříve než tečného napětí meze kluzu  $\tau_k$ , pak je vrstva odřezávaného materiálu odtržena. Velký úhel čela  $\gamma$  způsobí větší normálové napětí => **menší deformace před odříznutím**. Velikost tohoto úhlu záleží na velikosti úhlu hlavního hřbetu  $\alpha$  a velikosti stoupání šroubovice  $\omega$ , jejichž hodnoty jsou vidět v kapitole 3.

#### 1.4.2 Obrábění austenitických ocelí

- zpracováno s pomocí [4], [8], [9], [10]

Všechny druhy nerezových ocelí jsou obtížně obrobitelné až na podskupinu tvořící feritické oceli. Dobrá obrobitelnost feritických ocelí spočívá v absenci niklu. Problémy přináší především rychlé opotřebení bříty, špatné lámání a odchod třísek. Nízká tepelná vodivost způsobuje plastické deformace řezné hrany. Nárůstky na bříty způsobují nízkou jakost povrchu. Chemická difúze mezi povrchem obrobku a bříty je dalším častým typem opotřebení. K poškození a destrukci nástroje nedochází pouze z důvodů abrazivního či adhezivního opotřebení, ale i praskáním či vylamováním řezné hrany. „Intenzivní adheze (navarování) materiálu obrobku (třísky) na břit způsobuje vytrhávání lasturových šupinek z povrchu bříty.“ [4, str. 63]



„Při obrábění korozivzdorných ocelí platí za těžkoobrobitelné především austenitické oceli. Obrobitelnost těchto ocelí je nepříznivě ovlivňována jejich velkým sklonem ke zpevňování za studena, nízkou tepelnou vodivostí a dobrou houževnatostí.“ [8, str. 13]

Obr. 1-20 - Lasturovité lomy převzato z [4]

Zpevnění za studena souvisí z velké části s přeměnou austenitické struktury na strukturu martenzitickou v případě, že je materiál vystaven působení vysokých deformací. Austenit jako takový je vázán na vysokou rychlost zpevňování za studena. Efekt zpevňování za studena může být tak výrazný, že na obrobené ploše obrobku vzniknou zóny s extrémně vysokou tvrdostí. Velký význam při obrábění má samozřejmě také typ krystalové mřížky, který ovlivňuje i samotné vlastnosti daného materiálu.

Obrobitelnost jednotlivých druhů austenitických ocelí je možno zlepšit austenitizačním žháním při teplotě 1000 až 1100 ° C a ochlazením vodou. Rozpustí se tím tvrdé karbidy z hranic austenitických zrn a dosáhne se stejnoměrné austenitizační struktury. Důležité je ochlazovat ocel takovou rychlostí, aby nedošlo k opětovnému vyloučení rozpuštěných karbidů. Ve většině případů, hlavně z ekonomického hlediska, je řízené ochlazování součástí primární výroby, například za tepla válcovaných normalizovaných profilů. To znamená, že profil je po vyválnování hned řízeně chlazen, aby nemusel být opět ohříván a poté znovu chlazen.

#### **Vliv chemických prvků v austenitické oceli na obrobitelnost je následující:**

**Chrom** - Samotná přísada chromu v oceli se vyznačuje malou odolností proti tečení. Přesto je přísadou ve většině nízkolegovaných ocelích již od začátku jejich vývoje, kdy se přidával do molybdenových ocelí ke zvýšení plasticity proti porušení při tečení, ke zlepšení korozní odolnosti a k potlačení sklonu ke grafitizaci. Při vyšším obsahu Cr se bude ve struktuře tvořit chromový karbid  $M_7C_3$ , jehož morfologie není výhodná, při popouštění totiž netvoří jemnou disperzi, ale dosti hrubé tyčinkovité útvary, které současně rozpustí relativně velké množství Mo, tím tedy ochudí ferit a sníží žárovevnost. Tyto tvrdé karbidy vznikají po hranici zrn a zvyšují abrazivní opotřebení nástroje, tím pádem se obrobitelnost materiálu zhorší. Pro lepší obrobitelnost je možné ocel řízeně legovat sírou, ale pozor, větší množství vede k výraznému snížení korozivzdornosti.

Je to feritotvorný prvek, používaný jako základní přísada všech korozivzdorných ocelí pro dosažení pasivovatelnosti a odolnosti proti oxidaci za vyšších teplot. Zabezpečuje žáruvzdornost ocelí.

**Molybden** - Vliv Mo je v přímé závislosti na typu a morfologii přítomné karbidické fáze. Mo se hlavně rozpouští ve feritu a tím žárovevnost oceli stoupá. V CrV ocelích se Mo příznivě projevuje do 1%. Vyloučení speciálního rovnovážného karbidu  $M_6C$  předchází precipitace karbidu  $M_2C$ , který má jehličkovitý tvar a také se vyskytuje v jemné disperzi. Za podmínek udržujících jeho existenci a při nízkém poměru V:C může být v CrMoV ocelích důležitým činitelem zvyšování jejich žárovevnosti. Austenitické oceli bez molybdenu se používají především z důvodu vyhovující ceny a slušné úrovně korozivzdornosti. Legování molybdenem se ale doporučuje především z důvodu zvýšení korozivzdornosti, odolnosti vůči hydroxidům a kyselinám (až na HCl). Zvýšení odolnosti proti korozi je významné především vůči agresivnímu prostředí, jako je mořská voda (chloridy), průmyslové prostředí (oxidy síry). Použití těchto ocelí je tedy výhodné např.: v chemických laboratořích, plaveckých bazénech, loďařském průmyslu atd..



Je to také feritotvorný prvek podporující tvorbu intermediálních fází a tím zvyšuje korozní odolnost ve všech prostředích, s výjimkou vroucích roztoků kyseliny dusičné. Zvyšuje především žárovevnost, ale nikoliv žáruvzdornost.

**Vanad** - Je feritotvorným prvkem. Karbid vanadu  $V_4C_3$  má tendenci vylučovat se v jemné disperzní formě, vzhledem k značné aktivační energii difúze vanadu, také pomalu hrubne a velice účinně může proto zvyšovat žárovevnost feritických ocelí. V chromových ocelích se vanad zčásti rozpouští při nižších koncentracích v karbidu  $M_{23}C_6$ , při vyšších koncentracích může vytvářet přednostně karbonitrid morfologicky i distribučně se nelišící od karbidu  $V_4C_3$ . Jeho vliv na žárovevnost těchto ocelí je ovšem menší než u Lavesových fází.

**Niob** - Účinek niobu na vlastnosti žárovevných ocelí je podobný účinku vanadu. Větší afinita niobu k uhlíku a vyšší bod tání jeho karbidu dává předpoklad vyšší stability karbidické fáze. Také potlačuje mezikrystalovou korozi. Legování pouze niobem bez současné přísady vanadu se používá jen zřídka. Karbidy niobu a vanadu mohou tvořit vzájemně nepřetržitou řadu tuhých roztoků. Když je množství vanadu 2x až 3x větší než niobu, může být niob zčásti vytěsněn z karbidické fáze a příznivě tím působit na žárovevnost tuhého roztoku.

**Nikl** – Tento prvek má výraznou odolnost proti korozi. Nikl se v matici úplně rozpouští, nevytváří tedy karbidy a tím zvyšuje houževnatost oceli. Zvýšení houževnatosti vede ke zhoršení obrobitelnosti austenitických ocelí, jak již bylo vysvětleno v podkapitole 1.4.1. Jeho přítomnost má dále pozitivní vliv na svařitelnost.

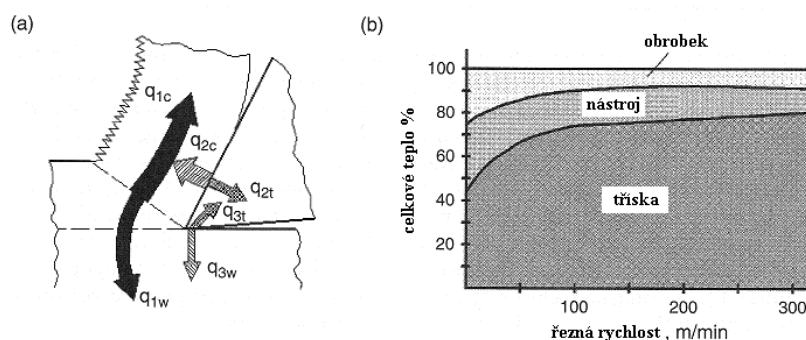
**Titan** - „Titanem stabilizované druhy austenitických ocelí se v podstatě obrábějí obtížněji, protože titan vytváří  $TiC$  a  $TiN$ , což zvyšuje abrazivní účinky. Obecně platí, čím větší procento legur, tím horší obrobitelnost.“ [9, str. 9] Nejdůležitějším prvkem, který přispívá ke zlepšení obrobitelnosti korozivzdorných ocelí, je síra. Pro speciální použití jsou k dispozici speciální automatové oceli.

**Měď** - Příkladky až 4 % Cu se aplikují do austenitických nerez ocelí, čímž se dosahuje zlepšení austenitické stability, odolnosti proti korozi i obrobitelnosti. Naskýtá se tedy možnost kompenzace vlivu síry přísadou mědi. Měď je vysoce rozpustná v austenitické fázi. Váže se přísadou niklu, který s ní tvoří tuhý roztok s vyšší teplotou tavení. Co se týče tvařitelnosti, bylo již v mnoha pracích dokumentováno, že u austenitických korozivzdorných ocelí obsahy Cu do 4 % neovlivňují podstatně tvařitelnost. Při obsahu Cu nad 4 % se však již tyto oceli, zejména v litém stavu, stávají velmi obtížně zpracovatelné tvářením.

### 1.4.3 Teplota řezání

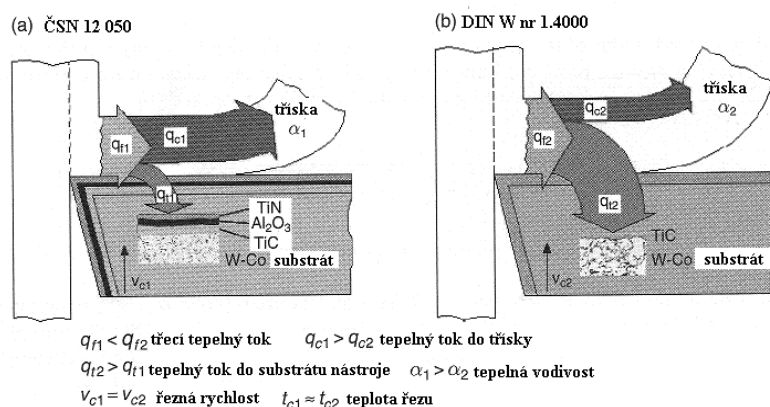
- zpracováno s pomocí [VII], [14], [15]

Teplná vodivost austenitické oceli je jen přibližně 30 % oproti uhlíkové oceli. Teplná vodivost je tedy velmi malá. Obrázek 1 – 21 a) místa vzniku a tepelné toky při řezném procesu. Teplo vzniká v místě primární, sekundární a terciální plastické deformace. Obrázek 1 – 21 b) ukazuje procentuální velikost tepla, kterou musí pojmout soustava nástroj – obrobek.



Obr. 1-21 - Distribuce tepla při řezání, b) vyjádřeno v procentech převzato z [14]

Obrázek 1-4 ukazuje tepelné toky při obrábění uhlíkové a austenitické oceli. Protože má austenitická ocel menší tepelnou vodivost, odchází více tepla do nástroje, což má negativní vliv na trvanlivost břitu. Podstatným rozdílem při obrábění — v porovnání s nelegovanou ocelí — je skutečnost, že austenitická ocel vykazuje menší tepelnou vodivost než ocel uhlíková. Při obrábění uhlíkové oceli je největší část vzniklého tepla odváděna třískami. Austenitická ocel se svojí malou tepelnou vodivostí a malou schopností pohlcovat teplo má za následek vyšší teplotu na břitu. Proto je u těchto ocelí nezbytné chlazení.

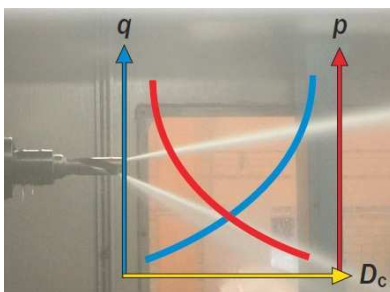


Obr. 1-22 - Tepelná distribuce pro a) uhlíkovou ocel, b) austenitickou ocel převzato z [15]

Při nahlédnutí do katalogu výrobců řezných nástrojů k obrábění korozivzdorných austenitických ocelí, je v drtivé většině doporučeno chlazení procesní kapalinou. Nástroje jsou dále opatřeny deponovanou vrstvou, která zamezuje šíření tepla do nástroje a následnou degradaci jeho mechanických vlastností. U šroubových monolitních SK vrtáků nebyl objeven při zpracovávání rešeršní části nástroj, který by nebyl deponován.



Chlazení bylo doporučeno u všech případů. Optimální je použití olejového roztoku (emulze), který by měl obsahovat aditiva pro extrémně velké tlaky. Objem oleje ve vodě by se měl pohybovat mezi 5 – 15%, přičemž při obrábění korozivzdorných ocelí se doporučuje pro dosažení vyšší životnosti použít koncentrace blízké se horní doporučené hranici. Přívod optimálně chladícími kanálky uvnitř nástroje o tlaku 70 bar, což dále zaručuje bezproblémový odvod třísek z místa řezu.

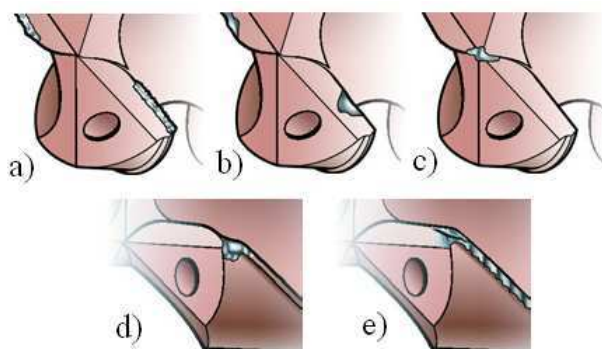


Obr. 1-23- Doporučená závislost mezi objemem kapaliny( $q$ ), tlakem ( $p$ ) a průměrem otvoru převzato z [VII]

#### 1.4.4 Opotřebení nástrojů

- zpracováno s pomocí [VII]

Stížené podmínky při obrábění austenitických ocelí, kterými jsou především vysoká houževnatost a malá tepelná vodivost materiálu obrobku, mohou předcházet specifickým druhům opotřebení řezného nástroje. Nástroje, které mají řeznou hranu vyrobenou ze slinutého karbidu, podléhají celkem běžnému abrazivnímu opotřebení na čelní ploše, po které odchází tříska z místa řezu. U deponovaného monolitního SK šroubovitého vrtáku by vlivem výše uvedených jevů mohly nastat krom abrazivního opotřebení následující opotřebení:



Obr. 1-24 - Opotřebení - a) nárůstek na břitu, b) vyštípnutá řezná hrana, c) přílišné opotřebení příčné ostří, d) plastická deformace vedlejšího hřbetu, e) tepelné trhliny převzato z [VII]

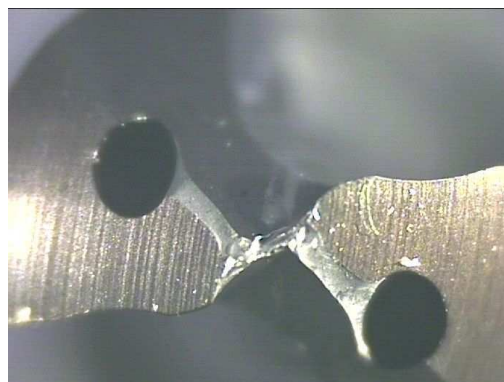
**a) Nárůstek na břitu** – Nebo také adhezní opotřebení, se šíří vlivem rozpadání stabilní váznuocí vrstvy (nárůstek, mikrosvar) vzniklé na ostří. K vytvoření nárůstku je předpoklad zpevňování již zpevněné třísky, vysoké teploty a tlaků na čele nástroje a na hřbetu těsně u ostří. Dostatečný přísun procesního média a vyšší součinitel tření deponované vrstvy omezují tvorbu nárůstku. Vyšší mazací účinnost procesního prostředí omezuje bodový styk, což vede ke snížení adheze. Stabilní nárůstek existuje jen v určitém pásmu řezných

rychlostí, neboť se zvyšováním řezné rychlosti  $v_c$  roste teplota v místě řezu, rozšiřuje se váznuoucí vrstva, kdy je bodový styk nahrazen plošným, což ve výsledku snižuje adhezi.

**b) Vyštípnutá řezná hrana** – Vlivem nepříznivých dynamických jevů během obrábění (vibrace či silové přetížení břitu vlivem nehomogenní struktury obráběného materiálu) dochází ke křehkým lomům, které vedou k vyštípnutí části ostří či celého břitu. K vyštípnutí části ostří může také dojít při intenzivní adhezi, jak je uvedeno v kapitole 1.4.2.

**c) Přílišné opotřebení příčného ostří** –

Toto opotřebení je celkem běžná záležitost i při obrábění nelegovaných konstrukčních ocelí. Jeho příčina může být jednak v překročení doporučeného posuvu na otáčku  $f_{ot}$ , příliš nízké doporučené řezné rychlosti a také v přílišném zeslabení příčného ostří. Z toho vyplývá, že při konstrukci/broušení příčného ostří je třeba zachovat dostatečnou délku příčného ostří a zamezit jeho zeslabení. Přílišné zeslabení může vést přímo k vyštípnutí příčného ostří, jak je patrné na obrázku 1-25.



Obr. 1-25 - Vyštípnutí příčného ostří

**d) Plastická deformace vedlejšího hřbetu** – Při překročení limitní teploty pro daný řezný materiál a stále přítomných dynamických účincích. Tato teplota může být dosažena překročením doporučené řezné rychlosti  $v_c$ , porušením nadeponované vrstvy zabraňující přílišnému oteplování břitu, či překročením doporučeného otupení ostří. U slinutých karbidů je limitní teplota plastické deformace dána vlastnostmi kobaltového pojiva, určující plastické vlastnosti materiálu. Dle rozsahu se může toto opotřebení dělit na místní (plocha řádově  $10^2$  nm) či lavinovité otupení, vyskytující se již ve větším objemu.

**e) Tepelné trhliny** – Tepelné trhliny předcházení vylomení celého „bloku“ materiálu z břitu, kdy je již překročena pevnost v ohybu. Tyto trhliny vznikají vlivem takzvaných teplotních šoků, které jsou příčinou přerušovaného řezu či nerovnoměrného ochlazování břitu. Překročení pevnosti v ohybu nastává vlivem dynamických rázů (vibrace či silové přetížení břitu vlivem nehomogenní struktury obráběného materiálu) či překročení doporučeného průřezu odžezávané vrstvy. Doporučené řezné podmínky pro obrábění korozivzdorné austenitické oceli a konstrukční uhlíkové oceli s mezí pevnosti v tahu  $R_m$  do 400 MPa.

**Nástroj:** Šroubovitý vrták, průměr nástroje  $D = 10\text{mm}$ , délka nástroje 5D, monolitní SK nástroj opatřený tenkou vrstvou, chlazení s vnitřními kanálky.

Nástroj	Tenká vrstva	Austenitická ocel		Konstrukční uhlíková ocel	
		Řezná rychlost [m/min]	Posuv na otáčku [mm/ot]	Řezná rychlost [m/min]	Posuv na otáčku [mm/ot]
1	TiAlN	70 - 110	0,1 - 0,15	125 - 160	0,19 - 0,27
2	Fire	55	0,2	145	0,315
3	TiCN+TiN	40 - 80	0,08 - 0,2	80 - 140	0,15 - 0,34

Tabulka 1-2 - Doporučené řezné podmínky

### 1.4.5 Kvalita obrobených ploch

- zpracováno s pomocí [9]

Na kvalitu obrobené plochy velmi negativně působí vznik stabilní váznuocí vrstvy v oblasti sekundární plastické deformace u čela nástroje a její následné rozpadání. Tato stabilní váznuocí vrstva – nárůstek - je podmíněna vysokými teplotami a schopností materiálu se plasticky tvářet již ve zpevněném stavu. Odchod nárůstku po čele může znamenat abrazivní poškození nástroje a jeho sníženou trvanlivost a dále rozkmitání nástroje, přičemž frekvence samobuzených kmitů je totožná s frekvencí rozpadání nárůstku (až 300 Hz). Oba tyto jevy, včetně odchodu nárůstku pod hřbetem, mají za následek zhoršení kvality obrobené plochy.

„Protože má austenitická ocel malou hodnotu smykového napětí, materiál třísek má tendenci nalepovat se na nástroj a tvořit nárůstek.“ [9, str. 32]



Obr. 1-26 - Zdrsněný povrch a špatná kvalita povrchu obrobku převzato z [9]

#### **Možné způsoby eliminace tvorby nárůstku:**

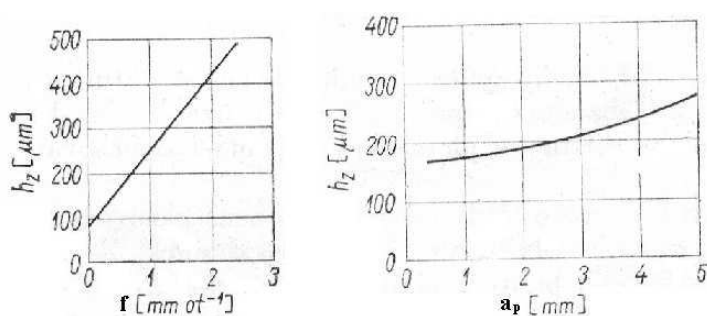
- Návrh co nejostřejšího břítu. Dojde k menší tlaku na břit a tím se zmenší i pravděpodobnost vzniku nárůstku. Optimalizace velikosti břítu se děje pomocí úhlu hlavního hřbetu  $\alpha$  a úhlu čela  $\gamma$ . Konkrétní vyjádření hodnot těchto úhlů viz kapitola 3.1.
- Volit co nejvyšší doporučenou řeznou rychlost z doporučeného intervalu (viz tabulka 1 - 2) „Při vyšších řezných rychlostech se nárůstek netvoří, dosáhnout vyšších řezných rychlostí (za stávající trvanlivosti) umožňuje u slinutého karbidu systém tenkých vrstev, tento systém tenkých vrstev ochraňuje břit před opotřebením a také často snižuje tření mezi čelem a třískou, což má opět pozitivní vliv na zamezení tvorby nárůstku.“ [9, str. 32]
- Při snížení řezné rychlosti k nejnižšímu doporučené rychlosti, nejsou vyvíjeny tak velké tlaky a teploty. Intenzita tvorby nárůstků se tím pádem zmenšuje.
- Používáním procesních médií s chladícím a mazacím účinkem se posunují podmínky pro růst nárůstku do oblasti vyšších řezných rychlostí.
- Při použití jiného řezného materiálu, který umožňuje docílit vyšší řezných rychlostí, než slinutý karbid. Je možné použít cermet, řeznou keramiku nebo kubický nitrid bóru. Nevýhoda těchto materiálů je jejich vyšší křehkost s porovnáním se slinutým karbidem a vysoká cena.



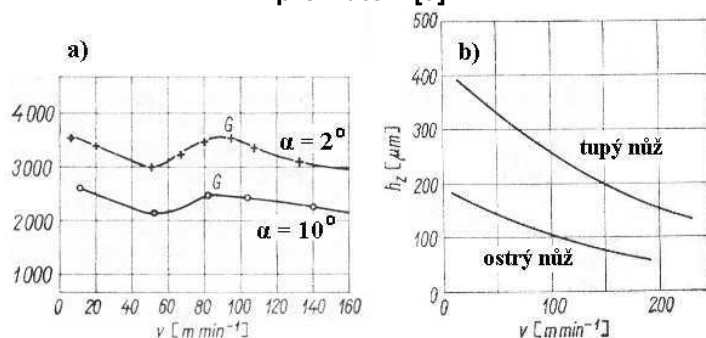
Obr. 1-27 - Nárůstek v drážce šroubovitého vrtáku

Oblast terciární plastické deformace pod ostřím nástroje má za následek zpevnování povrchové vrstvy obrobku a tím růst mikrotvrdosti. „Hlavní příčinou deformace povrchové vrstvy obrobku je tvar řezné hrany nástroje. Ostří nástroje totiž není ideální přímka, ale část válcové plochy o poloměru 5 až 20  $\mu\text{m}$ . Proto se nástroj stýká s obrobeným povrchem na ploše BAC.“ [9, str. 33] Řezné podmínky ovlivňující hloubku zpevněné vrstvy  $h_z$ :

- řezná rychlost  $v_C$ , hloubka řezu  $a_p$ , tloušťka třísky  $h$ .



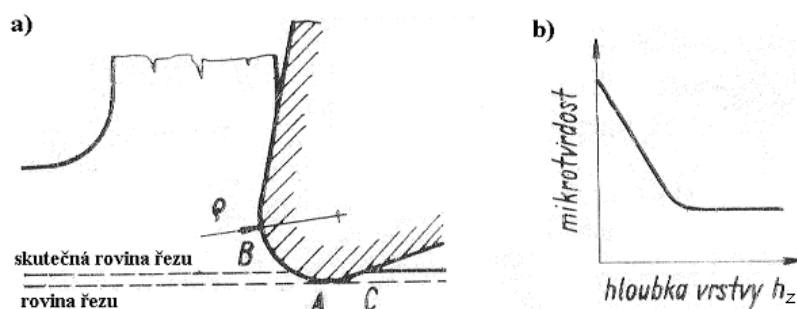
Obr. 1-28 - a) Vliv posuvu na hloubku zpevnění, b) vliv hloubky řezu na hloubku zpevnění převzato z [9]



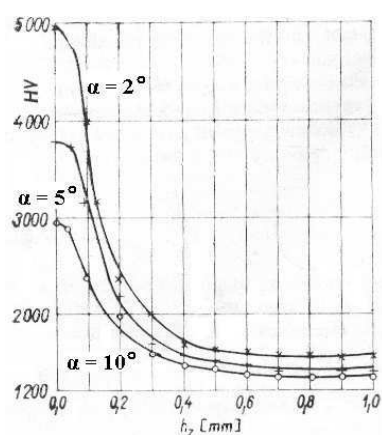
Obr. 1-29 - Vliv úhlu hřbetu na zpevnění povrchové vrstvy, b) vliv zaoblení ostří  $r_N$  na hloubku zpevněné vrstvy převzato z [9]

Geometrické parametry ovlivňující hloubku zpevněné vrstvy  $h_z$ :

- úhel hřbetu  $\alpha$ , poloměr zaoblení špičky  $r_e$ , poloměr ostří  $r_N$



Obr. 1-30 - Deformace povrchové vrstvy vlivem poloměru zaoblení ostří, b) závislost velikost zpevnění na hloubce převzato z [9]



Obr. 1-31 - Vliv úhlu hřbetu na velikost a hloubku zpevnění převzato z [9]

### Možné způsoby zlepšení kvality vrtaných otvorů:

- Zmenšení drsnosti povrchu se dosáhne zmenšením posuvu na otáčku na polovinu až třetinu původní hodnoty. Zmenšením posuvu se zmenší odstupy stop po nástroji.
- Pokud se sníží úhel nastavení hlavního ostří  $\kappa$ , respektive vrcholový úhel vrtáku  $\varepsilon$  z doporučených  $140^\circ$  na  $100^\circ$ , dojde ke zmenšení tloušťky třísky, které mají menší abrazivní účinek na povrch otvoru při jejich odchodu. Tato úprava je však v rozporu s požadavkem co nejostřejšího břitů.
- Zmenšením vrcholového úhlu se dále zlepší středící schopnost otvoru.
- Kvalita je zlepšena použitím mastnějších procesních kapalin (15% olejové emulze).
- Spirálová rýha při vyjíždění nástroje se eliminuje vypnutím rotace nástroje v požadované hloubce a jeho následným vyjetím.
- Volit dostatečně tuhý způsob upínání (hydraulické, tepelné upínání, tribos) s co nejmenší hodnotou radiálního házení.
- Symetricky nabroušená špička nástroje.



## 2. Analýza současného stavu řešené problematiky

Následující kapitola bude zaměřena na současný stav využívání SK monolitních nástrojů pro obrábění korozivzdorných austenitických ocelí. Okrajově se zaměří na obecnou výrobu šroubovitých nástrojů a na další možné cesty zvyšování jejich užitných vlastností, které jsou dány především vhodnou volbou správného typu karbidu, typu depozice a tenké vrstvy. Více se již následující text zaměří na konkrétní typy hřbetních ploch, které jsou voleny pro obráběný materiál.

### 2.1 Výroba šroubovitých vrtáků

- zpracováno s pomocí [VIII], [XIV]

Broušení monolitních SK šroubovitých vrtáků na NC strojích s CNC řízením patří v dnešní době k nejprogresivnější technologii výroby. Používají se 5 – ti osé nástrojařské brusky. Vrták lze vybrousit pomocí 2D výkresové dokumentace. „Výbrus drážky a typ výbrusu špičky (vyšpicování) se volí na stroji (v CAM softwaru) podle zkušeností výrobce a podle předpokládaného použití nástroje. V případě tvarově složitějších nebo netypických nástrojů může být vhodné nejprve vytvořit 3D model vrtáku, který následně poslouží k různým účelům: k definici průřezu šroubovitě drážky, k pevnostní analýze, vizualizacím, atd.“ [VIII, str. 1]

V případě využití 3D CAM modelů je na trhu k využití několik moderních softwarových produktů. Jedním z nich je specializovaný software pro řízení výroby a ostření různých nástrojů NUMROT*Plus*, jež bude dále využit v kapitole 4 „Návrh technologie výroby šroubovitěho monolitního vrtáku.“ Program slouží jak k výrobě nových nástrojů i k přeostření stávajících nástrojů. „S jeho pomocí lze vyrábět nebo brousit i speciální kombinované nástroje. Model nástroje zhotovený pomocí programu přesně odpovídá vlastnímu procesu broušení, neboť stoprocentně respektuje geometrii brusného kotouče, včetně rádiusů a úhlů. I když software umožňuje výkonnou 2D simulaci, před broušením komplexních nástrojů je žádoucí provést 3D simulaci celého nástroje.“ [IX, str. 1] Programování je nezávislé na stroji, provádí se na stolním počítači. Výroba SK monolitního šroubovitěho nástroje s vnitřními chladicími kanálky probíhá v několika krocích:

- **Příprava roubíku** – Z polotovaru uříznutého na požadovanou délku, ve kterém jsou již připravené kanálky pro vnitřní přívod procesní kapaliny, jejichž směr stoupání je značen vyrytou šroubovicí, bude vybroušen roubík vrtáku o přesných rozměrech.



Obr. 2-1 - Roubík (nahore), polotovar roubíku (dole) převzato z [VIII]

Roubíky z rychlořezných nástrojových ocelí, tedy z materiálu, který je oproti slinutému karbidu houževnatější, se mohou dále vyrábět následujícími technologiemi, které vedou k větší úspoře nástrojového materiálu:

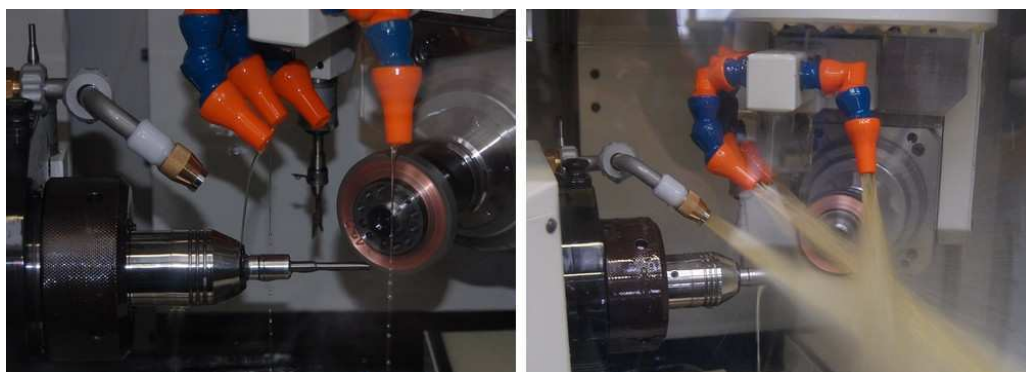
- **frézování tvarovými frézami** – vrtáky nad průměr 10 mm.
- **sektorové válcování** – válcování drážek za tepla pomocí segmentových válců. „V průběhu operace tváření za tepla jsou vlákna materiálu zhutňována a usměrňována, což se následně projevuje velmi dobrou tuhostí a stabilitou vrtáku při vrtání. Tvářené vrtáky se vyrábějí pouze s normálním úhlem sklonu šroubovice.“ [XIV]
- **protlačování za tepla** – protlačování materiálu přes tvarový prstenec ohřátého do oblasti austenitu
- **zkrucování** – z tyčí, jež mají po obvodu vyfrézované přímé drážky, pro vrtáky do průměru 6 mm
- **další možné technologie** – příčné válcování, kování v zápustkách
- **Předbroušení kanálů**

Drážka vybroušená na čele upínací stopky je klíčová pro přívod procesní kapaliny. Při upnutí do brusky je důležité určit polohu otvorů kanálků sondou pro budoucí přesnou polohu drážky. Dotyky sondy jsou ve tvaru hrotu.



Obr. 2-2 - Drážka přes chladící kanálky převzato z [VIII]

- **Broušení šroubovitě drážky a špičky** – Před zahájením broušení je opět ověřena poloha otvorů chladících kanálků dotykovou sondou. Broušení šroubové drážky probíhá tzv. na jednu třísku diamantovým kotoučem o zrnitosti volené dle typu slinutého karbidu. Po každé dílčí operaci jsou rozměry a tvar vybroušené plochy kontrolovány optickou sondou. Konkrétní operace nutné pro vybroušení hřbetních ploch, hlavních ostří a příčného ostří budou podrobně popsány v kapitole 3.



Obr. 2-3 - Broušení šroubovitě drážky převzato z [VIII]

## - **Kontrola nástroje**

Během obrábění je nástroj kontrolován nejen optickou sondou, ale i obsluhou stroje pomocí lupy. Hotový nástroj je poté kontrolován pomocí dílenského mikroskopu či speciálního přístroje s kamerovým systémem. Příkladem může být 5 – ti osé kamerové měřící centrum *ZOLLER genius 3*. Měření probíhá bezdotykově, nástroj je snímán kamerami. Automaticky je možné proměřit různé parametry, např. průměr nástroje, úhel čela, stoupání šroubovice, zkontrolovat fasetky, házivost, atd. [VIII, str. 1].



**Obr. 2-4 - Měřící centrum *ZOLLER genius*  
převzato z [XVIII]**

## **2.2 Broušení hřbetních ploch šroubovitých vrtáků**

- zpracováno s pomocí [16], [17]

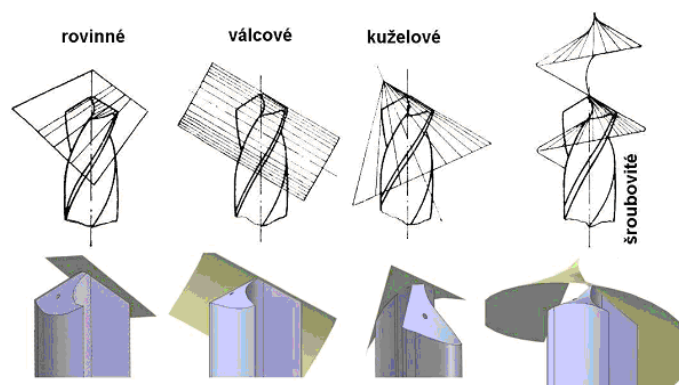
Dle závěrů z předešlých kapitol se návrh monolitního vrtáku zaměřil pouze na celokarbidový šroubovitý nástroj. Pro připomenutí, konstrukční materiál nástroje je upřesňující zadání diplomové práce a dále šroubovitý nástroj je volen kvůli absenci jiných konstrukčních řešení vrtáku při obrábění korozivzdorných austenitických ocelí. V této podkapitole bude nástroj opět více specializován, a to tvarem hlavních hřbetních ploch a principem jejich vzniku, tedy kinematikou broušení.

Hřbetní plocha nástroje je pouze část plochy vzniklé pohybem brusného nástroje. Aby nástroj fungoval správně, tedy aby byl co nejpřesněji dodržen tvar vrtaného otvoru, nástroj měl požadovanou trvanlivost a dále nedocházelo k nepříznivým dynamickým vlivům (vibrace, nárůst složek řezných sil), je třeba, aby byly hřbetní plochy nabroušeny přesně symetricky dle osy. Přesné nabroušení hřbetních ploch totiž zaručuje zachování správné délky hlavních ostří. Některé z možných ploch jsou vidět na obrázku 2 – 5. Krom tvaru brusné plochy a jejich upřesňujících parametrů (poloha souřadného systému plochy a nástroje, vzájemná poloha os, atd.), mají na výsledný tvar hřbetu a jeho průběh vliv další upřesňující parametry, jako je počet os souřadného systému, který je využit při broušení, a dále tvar brusného kotouče (viz obrázek 2 – 6).



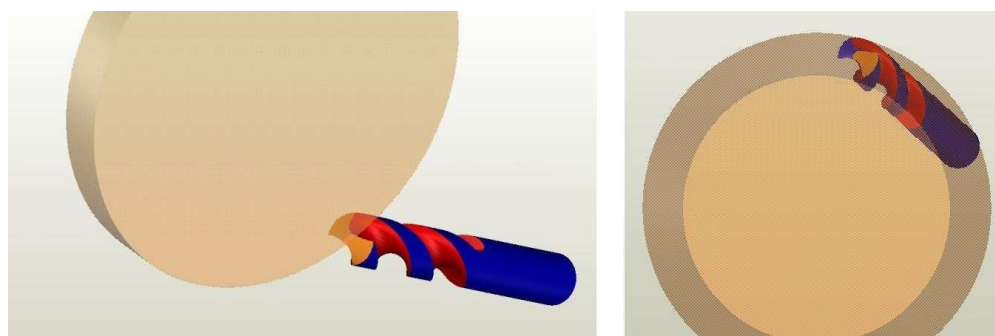
Možné tvary hřbetních ploch:

- elipsoidní
- kuželová
- hyperboloidní
- šroubovitá
- rovinná
- válcová



Obr. 2-5 - Tvary některých brusných ploch převzato z [16]

V další fázi získávání informací k rešeršní části diplomové práce, bylo třeba zjistit, které z tvarů hřbetních ploch jsou využívány u šroubovitých monolitních SK nástrojů k obrábění korozivzdorných austenitických ocelí. Bylo vybráno celkem osm nástrojů zahrnujících jak české, tak zahraniční podniky. Výhradně jsou využívány kuželové rovinné výbrusy, přičemž 5 nástrojů z osmi mělo výbrus kuželový. Z tohoto důvodu se další postup práce zaměří na tyto dva tvary hřbetních ploch.



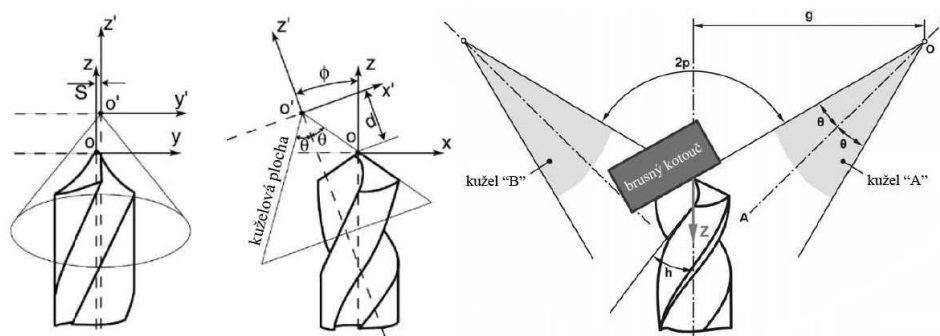
Obr. 2-6 - Broušení obvodovým kotoučem (vlevo), hrncovým kotoučem (vpravo) převzato z [17]

### 2.2.1 Kuželový způsob

- zpracováno s pomocí [17], [18]

Kuželový způsob broušení hlavních hřbetních ploch patří mezi nejpoužívanější možné typy broušení nejen u nástrojů pro obrábění austenitických ocelí. Jedná se o velice jednoduchý způsob vybroušení hřbetních ploch na jejichž výsledný tvar a geometrii mají vliv následující, v minulé kapitole již předběžně zmíněné optimalizovatelné parametry:

- $\emptyset$ : úhel mezi osami  $z$  a  $z'$
- $\Theta$ : poloviční úhel kuželu
- $d$ : vzdálenost mezi vrcholem vrtáku  $O$  a vrcholem kuželu  $O'$  měřené v ose  $z'$
- $S$ : vzdálenost mezi osami  $y$  a  $y'$  (měřeno v ose  $x$ ) [17, str. 25]



Obr. 2-7 - Parametry broušení (vlevo), schéma broušení (vpravo) převzato z [17]

Nástroj a brusný kotouč leží v následujících souřadných systémech, jejichž vzájemnou polohu lze zjistit z rovnice 2 – 1:

- $x, y, z$ : souřadný systém vrtáku (umístěn do špičky vrtáku – bod  $O$ )
  - $x', y', z'$ : souřadný systém kužele (umístěn do vrcholu kužele – bod  $O'$ )
- [17, str. 25]

Na obrázku 2 – 7 je vidět osa  $Z$  vrtáku, kolem které koná rotační pohyb a osa  $Z'$ , kolem které se otáčí brusný nástroj sklopený pod úhlem  $\Theta$ . Výsledná plocha vzniká průnikem dvou navzájem symetricky položených kuželů, které svým pohybem vytváří brusný kotouč. Každý ze hřbetů má svůj vlastní kužel, proto je nutné broušení opakovat. Souřadnice vrcholů jednotlivých kuželů  $O [x, y]$ , lze vyjádřit z matice transformace  $T$ .

$$\begin{bmatrix} 1 \\ x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} 1 \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\sqrt{d^2 \tan^2 \Theta} - \sqrt{S^2} & \cos \emptyset & 0 & \sin \emptyset \\ -S & 0 & 1 & 0 \\ d & -\sin \emptyset & 0 & \cos \emptyset \end{bmatrix}$$

Rovnice 2-1 - Vztah mezi souřadnými systémy (vlevo), matice transformace  $T$  (vpravo) převzato z [18]

### 2.2.2 Rovinný způsob

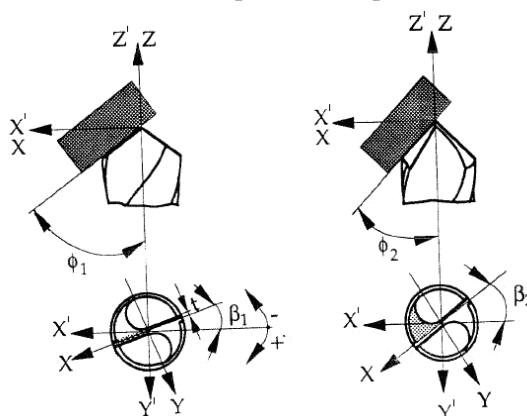
- zpracováno s pomocí [17]

Toto je způsob, používaný především u malých vrtáků (průměr menší než 1 mm), kde by využití jiné metody (elipsoidní, hyperboloidní, kuželové) bylo technicky náročnější, než tento poměrně jednoduchý způsob. Plocha hlavních hřbetů je složena ze dvou primárních a dvou sekundárních rovin. Vznik těchto rovin je možný hned několika způsoby:

### 1) Jedním brusným kotoučem:

Na následujícím schématu je možné vidět vzájemnou polohu vrtáku a brusného kotouče. Během broušení primární plochy hřbetu (vlevo), je brusný kotouč od osy vrtáku sklopen o úhel  $\phi_1$ , přičemž rotující vrták je pootočen o úhel  $\beta_1$ . U broušení sekundárních ploch (vpravo) je situace analogická, mění se indexy u jednotlivých úhlů. Souhrn a význam jednotlivých symbolů z následujícího schématu:

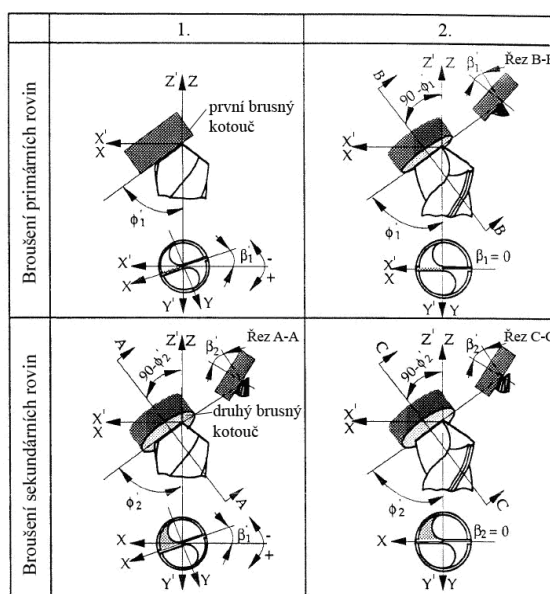
- $x, y, z$ : souřadný systém vrtáku (umístěn do špičky vrtáku – bod O)
- $x', y', z'$ : souřadný systém rovinných ploch
- $\phi_1, \phi_2$ : úhel mezi brusným kotoučem a osami  $z, z'$
- $\beta_1, \beta_2$ : úhel mezi osami  $x$  a  $x'$  [17, str. 34]



Obr. 2-8 - Schéma rovinného broušení jedním kotoučem převzato z [17]

### 2) Dvěma brusnými kotouči:

V tomto případě je důležitý posuv broušeného vrtáku k pevně daným polohám rotujících brusných kotoučů. Kotouče jsou sklopené pod úhly  $\phi_1, \beta_1$  a  $\phi_2, \beta_2$ .



Obr. 2-9 - Broušení dvěma kotouči převzato z [17]

### 3) Bez rotace vrtáku:

V tomto případě jsou úhly  $\beta_1$  a  $\beta_2$  (úhly mezi osou vrtáku  $x$  a osou kotouče  $x'$ ) pro obě hřbetní plochy nulové. Vrták nekoná rotační pohyb, přičemž požadovaný tvar hřbetu vzniká pouze rotací a naklápěním kotouče.

## 2.3 Cesty ke zvyšování užitečných vlastností nástrojů

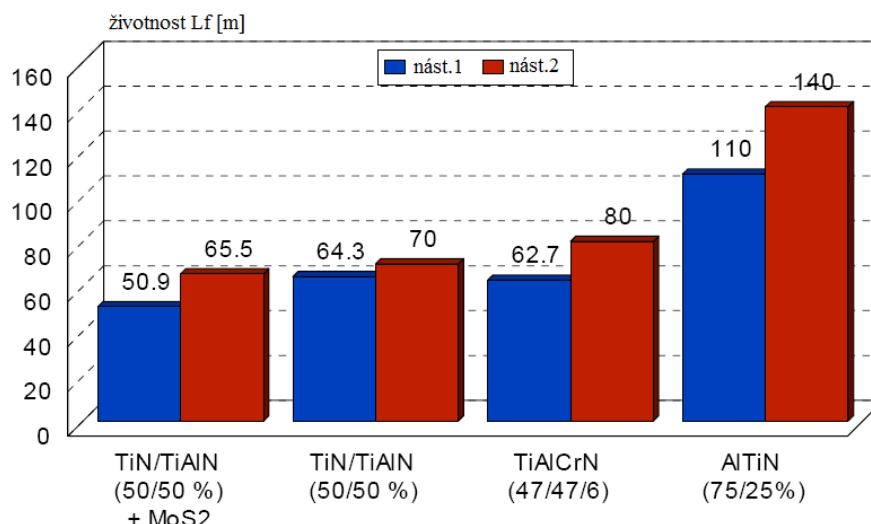
Při návrhu obráběcího nástroje jeho správná funkce a požadovaná trvanlivost nezávisí pouze na vhodně vytvořené geometrii, ale také na správně zvoleném konstrukčním materiálu nástroje, popřípadě na správné depozici tenkých vrstev. To znamená, že například sebelépe navržená geometrie nebude fungovat s nevhodnou tenkou vrstvou, která nezamezí průniku tepla z místa řezu do nástroje, kde degradují jeho mechanické vlastnosti. Platí, že geometrie, materiál nástroje a tenká vrstva musí tvořit fungující systém. Tak například teplota při deponování tenké vrstvy nesmí ovlivňovat základní substrát, což by mohlo zapříčinit jeho teplotní degradaci. V následujícím textu jsou uvedeny některé druhy progresivních tenkých vrstev a slinutých karbidů využívaných při obrábění austenitických korozivzdorných ocelí. Dále je nutné u moderních nástrojů dodržet požadované pracovní podmínky. To znamená, že pokud je předepsán pro chlazení vnitřními kanálky tlak minimálně 40 bar, je nutné tento tlak dodržet a použít vhodný obráběcí stroj, který tento tlak poskytne.

### 2.3.1 Druhy deponovaných vrstev

- zpracováno s pomocí [24], [25]

Pro obrábění korozivzdorných austenitických ocelí se v dnešní době jen zřídka používají monovrstvy jako například TiN (nitrid titanu), jež dosud patří k jedné z nejpoužívanějších tenkých vrstev na řezné nástroje. Dnes je trendem deponovat nástroje technologií **TripelCoatings®**, jež umožňuje vytvoření tenké vrstvy s unikátními vlastnostmi, jako je vysoká pevnost, tvrdost a teplotní stabilita. V této podkapitole budou uvedeny některé základní informace o vrstvě AlTiN, vhodné pro nástroje k obrábění korozivzdorných ocelí. Porovnána bude s vrstvami deponovanými pomocí technologií **TripelCoatings®** ( $n\text{ACo}^3$  a  $n\text{ACRo}^3$ ) a **LARC** ( $n\text{ACo}$ ). Tenké vrstvy jsou na nástroje ze slinutého karbidu aplikovány především kvůli zvýšení tvrdosti, abrazivní odolnosti a dále tvoří tepelnou bariéru mezi nástrojem a obrobkem v místě řezu.

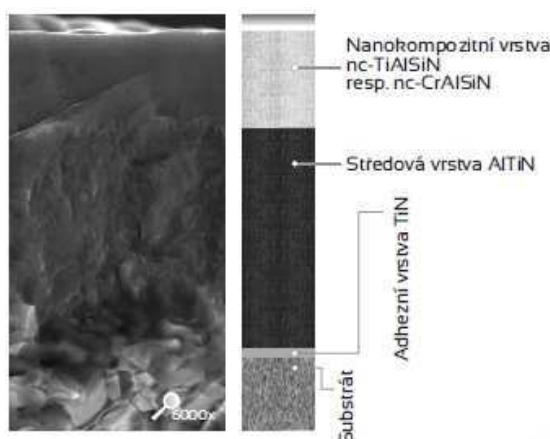
Vrstva **AlTiN** je univerzální vrstva pro obrábění celé škály materiálů. Mikrotvrdost vrstvy se pohybuje mezi 25 až 33 GPa, přičemž pracovní teplota je až do 900°C. Díky multivrstvému systému se dosahuje uspokojivých poměrů houževnatost/tvrdost. Pokud není použito procesních kapalin, vytváří se poblíž místa řezu povrchová vrstva  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , jež při obrábění snižuje tření, zvyšuje difúzní odolnost a zlepšuje řezné vlastnosti. Nejmodernější využití vrstva nachází u takzvaných nc-vrstev  $n\text{ACo}_3$  od firmy PLATIT, deponovaných pomocí technologie TripleCoatings<sup>3®</sup>. Na grafu níže je vidět dosahovaná životnost nástrojů s povlaky na bázi hliníku. Byl vrtán materiál 42CrMo4V – mez pevnosti v tahu  $R_m = 1000\text{MPa}$ , průměr nástroje  $D = 6,8\text{ mm}$ , řezná rychlost  $v_c = 110\text{ m/min}$ , posuv na otáčku  $f_{ot} = 0,1\text{ m/ot}$ , chlazení pomocí olejové emulze.



Obr. 2-10 - Trvanlivost nástroje vyjádřena v metrech převzato z [24]

Pomocí **TripleCoatings<sup>3</sup>**® technologie lze deponovat systémy vrstev odlišné chemickými, depozičními podmínkami či strukturami jednotlivých vrstev. Tloušťka TripleCoatings vrstev se pohybuje mezi 1 a 7  $\mu\text{m}$ , přičemž tloušťka mezivrstev může dosahovat rozměrů od desetin mikronu až po několik mikronů. Nejvrchnější vrstva systému, většinou nanokompozitního nebo nanovrstvená, je nejtvrďší (mikrotvrdość v rozmezí 32 až 45GPa) za vysokých teplot (až 1100 °C).

**Vrstva nACo<sup>3</sup>**, doporučována k obrábění těžkoobrobitelných materiálů včetně austenitických ocelí, se skládá ze tří vrstev, které tvoří nanokompozitní mikrostruktura. První TiN vrstva, s výbornými adhezními vlastnostmi, následuje AlTiN vrstva a nakonec AlTiSiN vrstva. Vlastnosti této vrstvy jsou extrémně vysoká nanotvrdość, vysoká tepelná odolnost, určená pro nástroje s vysokým požadovaným řezným výkonem.



Obr. 2-11 - Struktura jednotlivých vrstev převzato z [25]

Název	Barva	Nanotvrdość [GPa]	Tloušťka [ $\mu\text{m}$ ]	Koeficient tření	Max. teplota použitelnosti [°C]
nACo3®	violet-blue	45 / 38	1-4	0,45	1200 / 900

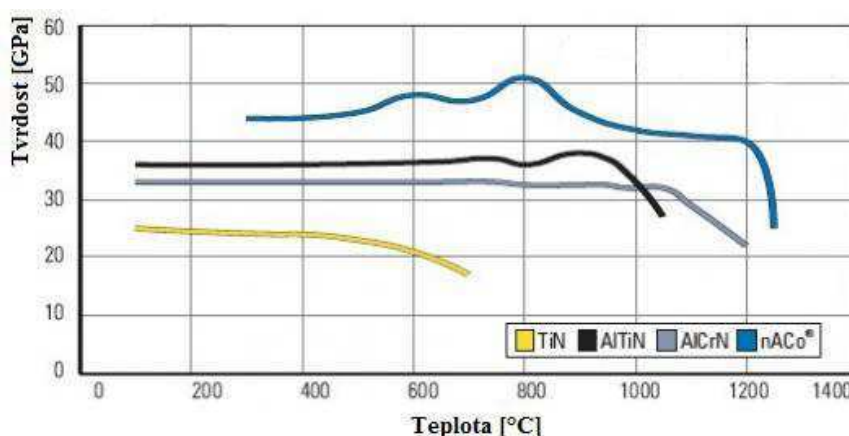
Tabulka 2-1 – Vlastnosti vrstvy nACo<sup>3</sup>® převzato z [25]

**Vrstva nACRo<sup>3</sup>** = Ti-CrN + AlTiN + nACRo<sup>®</sup> modifikací vrstvy nACRo. Tato vrstva je nástupcem nACRo<sup>®</sup>. Její vlastnosti jsou uvedeny v následující tabulce.

Název	Barva	Nanotvrdost [GPa]	Tloušťka [μm]	Koeficient tření	Max. teplota použitelnosti [°C]
nACo <sup>®</sup>	violet-blue	45 / 40	1-4	0,45	1200 / 1100

**Tabulka 2-2 – Vlastnosti vrstvy nACo<sup>®</sup> převzato z [25]**

**Vrstva nACRo<sup>®</sup>** je nanokompozitní vrstva na bázi nc-AlTiN / a-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> deponovaná pomocí nových PVD technologií využívajících boční rotační elektrody (ARC katody), tzv. LARC<sup>®</sup>-technologie. Tyto vrstvy mají vysokou oxidační odolnost (do 900 °C) a vysokou mikrotvrdost 38-50 GPa. Systém je termodynamicky stálý, nedochází k růstu zrn mikročástic tvořících vrstvu (do 1000 °C). „Při obrábění austenitických ocelí je snaha tyto faktory co nejvíce snižovat. Tribologickou analýzou „PIN-on-DISC“ byly porovnávány dvě vrstvy: nACo a AlTiCrN. Vrstva nACo byla deponovaná LARC metodou a AlTiCrN běžnou PVD metodou. Bylo prokázáno, že depozice LARC dosáhla snížení tření o 30% oproti monovrstvě AlTiCrN.“ [24, str. 113]



**Obr. 2-12 - Srovnání závislosti tvrdosti na teplotě různých vrstev převzato z [24]**

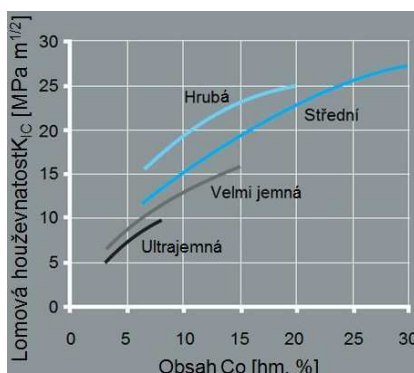
### 2.3.2 Druhy slinutých karbidů

- zpracováno s pomocí [19], [24]

Jelikož šroubovitý vrták má velmi složitou makrogeometrii ostří, jež celkově snižuje tuhost celého nástroje, patří obrábění těmito nástroji mezi nejproblematictější způsoby obrábění. Jak již bylo řečeno v předchozích kapitolách, při vrtání dochází k tvorbě velkého množství tepla, které se bez vnitřního chlazení velmi špatně odvádí. Vrtání bez přerušování řezu od hloubek 8D je problematické z důvodu odvodu třísek z místa řezu a vyššímu osovému namáhání vrtáku ve vzpěru. Během odchodu třísek šroubovicí dochází ke tření, které způsobuje abrazivní opotřebení nástroje.

Pro výrobu monolitního vrtáku z SK, který je určen pro vrtání děr délky od 8D, se vyrábí z nejhoubavějších sort SK, které mají vysoký obsah Co, cca.10% a mají středně velká karbidická zrna 0,5 - 1μm. „Klasickým zástupcem těchto karbidů je například **TSM33 od firmy CERATIZIT**, jež má průměrnou velikost zrna 0,5 až 0,9 μm, dosahuje tvrdosti 1590

HV a hodnotu součinitele lomové houževnatosti  $K_{IC} = 9,4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ .“ [24, str. 73] Dalším zastupitelem může být karbid *AF K40UF od firmy Arno Friedrichs Carbide*, který má průměrnou velikost zrn  $0,6 \mu\text{m}$ , dosahuje tvrdost 1610 HV30.

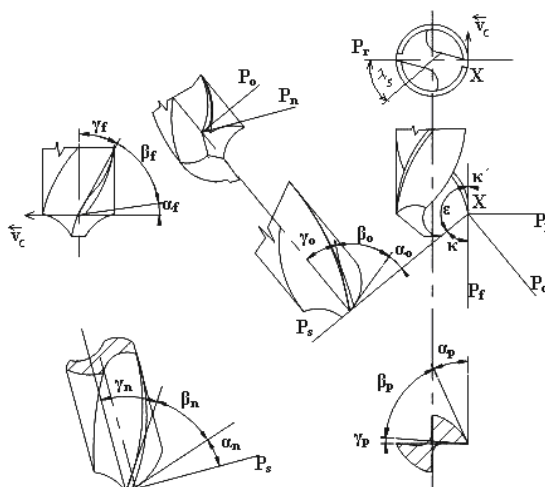


Obr. 2-13 – Lomová houževnatost v závislosti na obsahu Co pojiva převzato z [19]

## 2.4 Geometrie šroubovitých vrtáků pro obrábění austenitických ocelí

- zpracováno s pomocí [2], [X], [20]

V této podkapitole budou uvedeny základní doporučené nástrojové úhly potřebné pro nabroušení vrtáku určeného pro obrábění austenitických ocelí. Nejprve je třeba připomenout statickou geometrii šroubovitého nástroje:



Obr. 2-14 - Geometrie šroubovitého vrtáku převzato z [20]

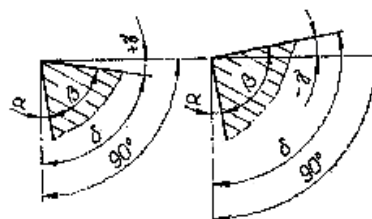
- $X$  Uvažovaný bod na ostří.
- $\overline{v_c}$  Vektor hlavní řezné rychlosti.
- $P_r$  Rovina základní, kolmá na vektor hlavní řezné rychlosti.
- $P_f$  Rovina posuvová, kolmá na rovinu základní, totožná s vektorem hlavní řezné rychlosti.
- $P_p$  Rovina přísunová, kolmá na rovinu základní a posuvovou, totožná s vektorem hlavní řezné rychlosti.
- $P_s$  Rovina ostří, kolmá na rovinu základní.



- $P_o$  Rovina ortogonální, kolmá na rovinu základní a rovinu ostří.  
 $P_n$  Rovina normálová, kolmá na ostří, kolmá na rovinu základní, pokud  $\lambda = 0^\circ$  .  
 $\alpha_i$  Úhel hlavního hřbetu, volen s ohledem na obráběný materiál a průměr nástroje (viz tabulka 3 – 1 a obrázek 3 – 2. Velikost má vliv na tření mezi nástrojem a obrobenou plochou.  
 $\beta_i$  Úhel břitu je dán velikostí úhlu hřbetu a čela. Při jeho zmenšování se také zmenšuje řezný odpor, ale klesá pevnost břitu.  
 $\gamma_i$  Úhel čela určuje společně s úhlem řezu polohu čela k pracovní rovině řezu. Při vysokém kladném úhlu řezu a záporném úhlu čela se břit stává celkově záporným, což má za následek vzrůst intenzity plastické deformace a následně větší tření odchozí třísky o čelo. Jeho hodnota se poloměrem nástroje mění v závislosti na průměru nástroje  $D_N$  a úhlu stoupání šroubovice  $\omega$  :

$$\gamma_o = 90^\circ - \arctan\left(\frac{D_N \cdot \operatorname{tg} \omega}{D_B}\right) \quad [2, \text{str. 22}]$$

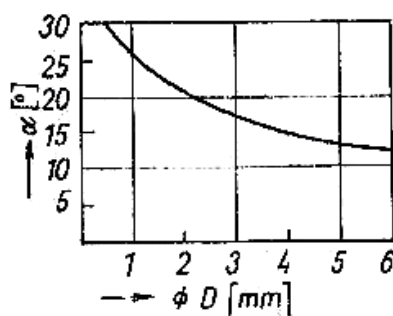
- $\gamma_o$  Úhel čela v ortogonální rovině.  
 $D_B$  Průměr měření úhlu čela.  
 $\delta_i$  Úhel řezu je dán součtem úhlu hřbetu a úhlu břitu.  
 $\varepsilon$  Úhel špičky nástroje,  $\varepsilon = 2\kappa$ . Volen opět dle druhu obráběného materiálu.  
 $\lambda_s$  Úhel sklonu ostří v rovině přísunové.  
 $\kappa$  Úhel nastavení hlavního ostří.  
 $\kappa'$  Úhel nastavení vedlejšího ostří.



Obr. 2-15 - Řezný klín převzato z [X]

Materiál obrobku	Úhel sklonu drážek $[\circ]$	Úhel hrotu $\varepsilon = 2\kappa [\circ]$	Úhel hřbetu $\alpha [\circ]$
Ocel do 70 kp . mm <sup>-2</sup>	30	110	10 až 12
Ocel 70 až 90 kp . mm <sup>-2</sup>	30	120	10 až 12
Oceli slitinové (zúšlechťené)			
90 až 120 kp . mm <sup>-2</sup>	30	130	8 až 10
Šedá litina	30	95	8 až 10
Měď, hliník	40	140	12 až 16
Slitiny hliníku	30	110 až 130	10 až 12
Mosaz, bronz	15	120	12 až 16
Plastické hmoty	15	80 až 100	12 až 15

Tabulka 2-3 - Volba nástrojových úhlů dle obráběného materiálu převzato z [X]



Obr. 2-16 - Volba úhlu hřbetu malých šroubovitých vrtáků převzato z [X]

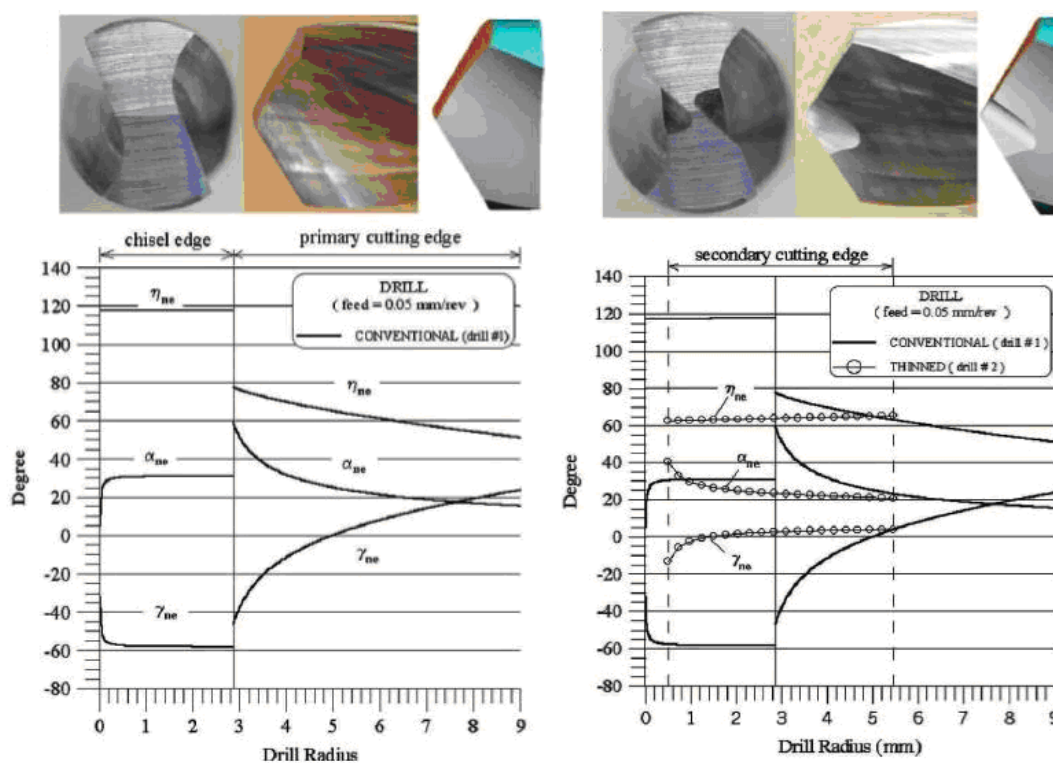


## 2.5 Úprava makrogeometrie šroubového vrtáku

### 2.5.1 Zkrácení příčného ostří

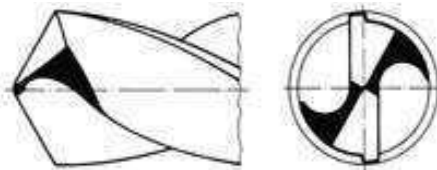
- zpracováno s pomocí [XIV], [XV], [XIX]

Při přeastřování vrtáků se odebrává tenká vrstva materiálu ze hřbetních ploch vrtáku. To má ovšem za následek prodloužení délky příčného ostří a díky tomu se zvětšuje potřebná řezná síla a moment pro obrábění s každým dalším přebroušením. K eliminaci tohoto problému se používá podbroušení příčného ostří, odborně nazývaného „zkracování“ příčného ostří. Hlavní myšlenkou této úpravy je eliminace velkého negativního úhlu čela podél primární řezné hrany. Jak je možné vidět na obrázku 2 – 17, podbroušením příčného ostří se docílí jeho zkrácení za vzniku sekundárního hlavního ostří. Je zde popsána změna průběhu úhlu čela  $\gamma_{ne}$ , úhlu hřbetu  $\alpha_{ne}$  a úhlu klínu  $\eta_{ne}$  v závislosti na poloměru nástroje.



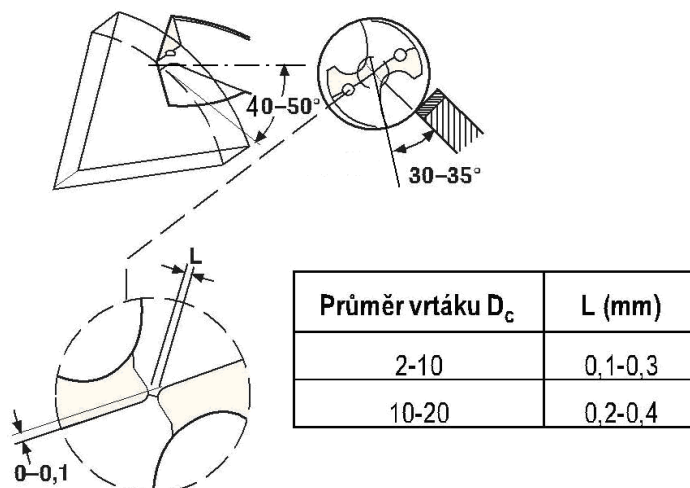
Obr. 2-17 - Hodnoty úhlů před a po broušení převzato z [XIX]

Při porovnání výkonu vrtání bylo zjištěno, že u vrtáku s příčným podbroušením **klesl točivý moment při vrtání o necelých 14 Nm**, přičemž vrták bez podbroušení měl již předvrtaný otvor o průměru 5 mm, aby se tak zamezilo vlivu posuvové síly při porovnávání výsledných výkonů vrtání.



Tabulka 2-4 - Křížový výbrus Typ C převzato z [XIV]

Z tohoto vyplývá, že úprava ostří šroubových vrtáků je důležitým faktorem pro zvýšení efektivity obrábění. U většiny zmapovaných šroubovitých vrtáků určených do austenitických ocelí v rešeršní části práce bylo zjištěno, že je používán výhradně křížový výbrus Typ C. Tento typ zkrácení příčného ostří je vhodný pro obrábění houževnatých a tvrdých materiálů s požadavkem vrtání hlubokých děr. Zkrácení zaručuje zmenšení posuvové síly a dobré středění. Dělená tříska se snadněji odvádí z místa řezu. Nevýhodou je potřeba přesně symetrického nabroušení.

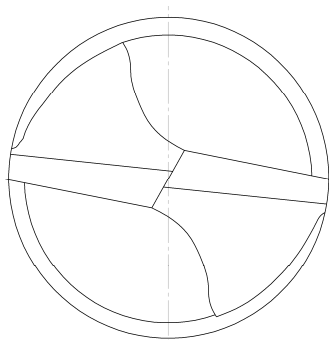


Obr. 2-18 – Doporučené hodnoty pro úpravu příčného ostří nástrojů pro obrábění korozivzdorných ocelí převzato z [XV]

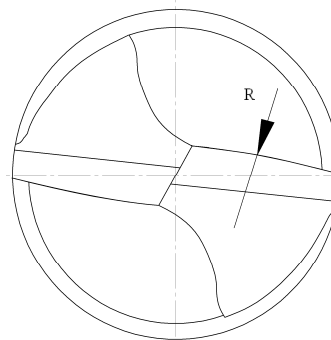
### 2.5.2 Tvar a úprava hlavního ostří

- zpracováno s pomocí [2], [XV]

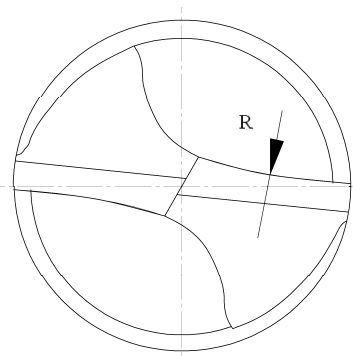
Během rešeršní práce bylo zjištěno, že u celokarbidových šroubovitých vrtáků k obrábění austenitických ocelí se používají průběhy hlavního ostří, jež je možno vidět na následujících obrázcích. Tvarový průběh se jeví pro obrábění austenitických ocelí jako nejvhodnější. Vyduť tvar zhruba uprostřed ostří zaručuje lepší zaříznutí do houževnatého materiálu, lepší dělení třísky a její směřování do šroubovitě drážky nástroje. Nevýhoda konkávního tvaru, tedy ostrý přechod na fasetce je eliminován přímkovým tvarem ostří v této oblasti. Snižuje se tím možnost vyštípnutí fasetky, tedy části ostří, která je nejvíce namáhána.



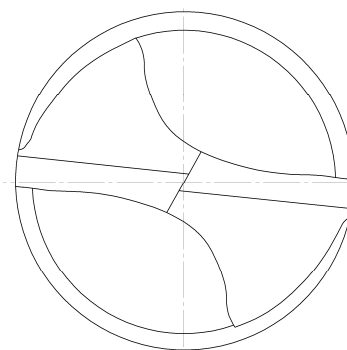
Obr. 2-19 – Přímkový průběh hlavního ostří



Obr. 2-20 - Konvexní průběh

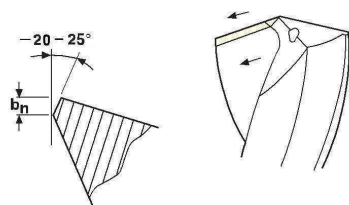


Obr. 2-21 - Konkávní průběh



Obr. 2-22 - Tvarový průběh

Další důležitou úpravou je sražení, popřípadě zaoblení hlavního ostří. Tímto definovaným ztupením nástroje se předejde vylomení nerovnoměrně nabroušeného břitu. Doporučené hodnoty tohoto druhu úpravy jsou vidět na obrázku 2 – 23. Rozměrově jsou uvedené doporučené hodnoty na mezi makro a mikro geometrií. Výroba negativní fasety je možná jak ručně tak strojně.



Materiál obrobku	$b_n$ (mm)	
	Průměrvrtáku $\leq$ 10	Průměr vrtáku $>$ 10
Ocel	0,05	0,10
Nerezové oceli	0,05	0,05 - 0,10
Litina	0,05	0,10

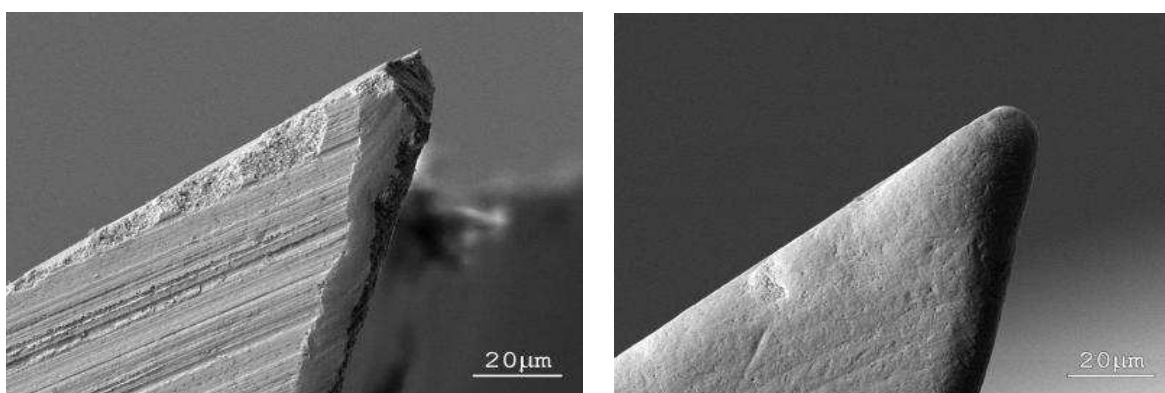
Zaoblení ostří R [mm]	Průměr nástroje Dn [mm]
0,02	0,8 - 6,0
0,03	6,1 - 18,0
0,04	18,1 a více

Obr. 2-23 - Doporučené hodnoty pro sražení břitu převzato z [XV] a zaoblení břitu

## 2.6 Úprava mikrogeometrie šroubových vrtáků

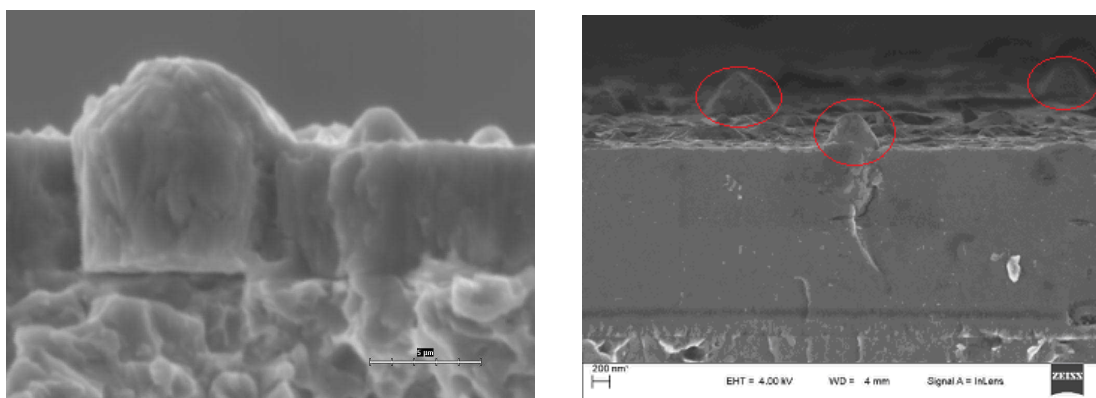
- zpracováno s pomocí [24], [XVII]

Stav povrchu nástroje je důležitým parametrem procesu obrábění především při obrábění za vyšších řezných podmínek na NC strojích, kde se projeví rozdíly mezi upravenými a neupravenými povrchy, popřípadě rozdíly mezi druhy jednotlivých úprav. Různé druhy úprav povrchu nástroje slouží především k odstranění nečistot a ostrých přechodů po broušení, což zaručuje lepší přilnavost tenkých vrstev v porovnání s neupravenými povrchy. Na ostrých přechodech může docházet k odlupování tenkých vrstev. „Po vybroušení monolitních SK nástrojů jsou břity většinou nerovnoměrné, přibližně v měřítku použitých brusných zrn. V důsledku fluktuací v geometrii broušení, kvalitě HM substrátů, kvality obsluhy CNC brusek a brusných kotoučů mohou nerovnoměrnosti na břitech působit vážné znehodnocení jeho řezného výkonu. To platí i o nástrojích renomovaných výrobců.“ [XVII. str. 1].



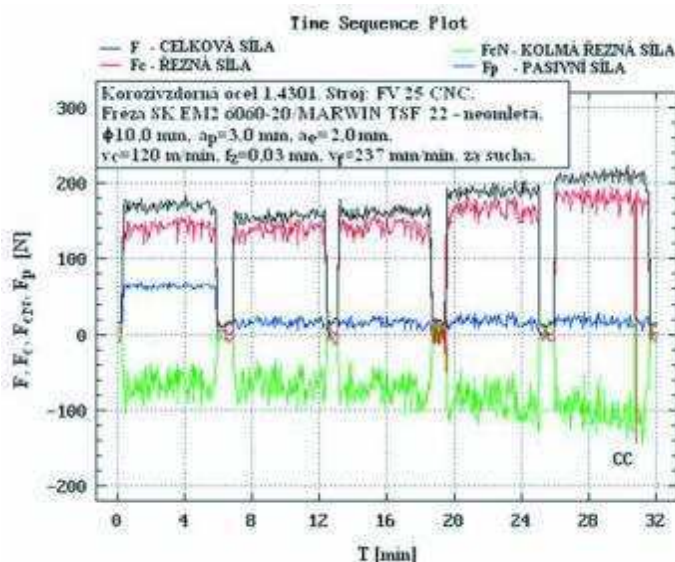
Obr. 2-24 - Stav břitu před a po úpravě mikrogeometrie převzato z [XVII]

„Drsnost základního materiálu je obvykle nižší než drsnost nedeponované vrstvy. Příčinou tohoto zvýšení drsnosti jsou vnesené makročástice během technologického procesu depozice. To může mít za následek zvýšení teploty a mechanického namáhání nástroje při řezání. Tomu lze zabránit perfektní úpravou substrátu před depozicí.“ [24. str. 113]. V dnešní době je již žádoucí zavádět úpravu povrchu nástroje i po depozici tenkých vrstev, během které se odstraní tyto nežádoucí makročástice, což vede ke konečnému snížení součinitele smykového tření. Dle teorie vzniku mikrosvar platí, že s nižší drsností povrchu nástroje také snižuje intenzitu vzniku nárůstků.

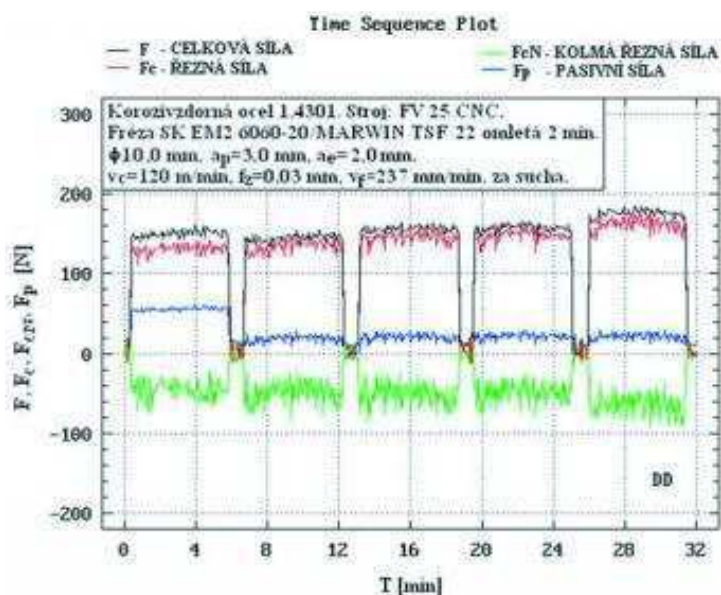


Obr. 2-25 - Makročástice vnesené během depozice převzato z [24]

Dle testů prováděných na VUT Brno a ve společnosti Pramet Tool, vede úprava mikrogeometrie nástroje ke snížení složek řezné síly, což vede ke snížení teploty a tím pádem ke zvýšení životnosti nástroje. Monolitní SK fréza byla omléta v granulátu s brusnou diamantovou pastou před deposicí a tím došlo k zaoblení řezné hrany na rádius cca 10  $\mu\text{m}$ . U následujících grafů je možné vidět pokles složek řezných sil včetně podmínek testu.



Obr. 2-26 - Test neomletého nástroje převzato z [XVII]



Obr. 2-27 - Test omlétého nástroje převzato z [XVII]

Na konečný stav mikrogeometrie má vliv vlastní druh úpravy. V tabulkách 3 – 5 a 3 – 6 jsou uvedeny některé metody úprav mikrogeometrie a relativní porovnání vlastností úprav. Během shromažďování informací k rešeršní části práce bylo zjištěno, že některé z firem vyrábějící monolitní SK nástroje k obrábění austenitických ocelí nevěnují pozornost úpravě mikrogeometrie.



Jedna z nejméně používaných úprav byla leštění či lapování pomocí past s diamantovými zrnky. Tyto možné úpravy však silně závisí na zkušenosti pracovníka a jsou vhodné spíše pro malosériovou výrobu než pro hromadnou produkci. Další rozšířenou operací je kartáčování diamantovými zrnky zapuštěnými v plastových vláknech. Intenzita „obrušování“ břitů je řízena rychlostí rotace a dobou, po kterou je nástroj vystaven kartáčování. Nevýhodou je nalepování plastových vláken na břit, jež jdou následně běžnými chemickými prostředky špatně odstranit. Proto je tato operace nevhodná pro úpravu povrchu před depozicí, kde je požadována co nejvyšší čistota povrchu. Jedna z méně využívaných, byť výrobci nástrojů využívaných, je tryskání korundovým či skleněným prachem. Rozšířenou metodou je v dnešní době zaoblování břitů omíláním v granulátech s brusnou pastou. Granulátem je myšleno médium (oxidy některých kovů – korund, karbidy – karbid křemíku, keramická tělíska, drcené ořechové skořápky), které unášejí pastu. Sada nástrojů vložená do omítacího stroje koná planetový pohyb. Požadovaná kvalita omletí je docílena vhodnou kombinací média a unášeného abraziva.

	Leštění v ruce	Kartáčování	Omílání v granulátech s brusnou pastou
<b>Kvalita</b>	nejlepší	střední	dobrá
<b>Reprodukovatelnost</b>	závisí na konkrétním pracovníkovi	dobrá	dobrá
<b>Flexibilita</b>	velmi vysoká	střední	dobrá
<b>Produktivita</b>	nízká	střední	střední
<b>Cena</b>	pouze plat pracovníků	střední, standardní stroje, jsou nabízeny	střední, standardní stroje, jsou nabízeny
<b>Jiné vlastnosti</b>	běžné pro malé firmy	běžně nabízeno pro frézy, obtížně použitelné pro závitníky	použitelné také pro leštění šroubovic, odstraňování makročásteček

Tabulka 2-5 - Typy mechanických úprav povrchu nástroje 1 převzato z [XVII]

	Mikropískování	Vodní paprsek	Úprava s magnetickým práškem
<b>Kvalita</b>	střední	dobrá	dobrá
<b>Reprodukovatelnost</b>	střední	dobrá	dobrá
<b>Flexibilita</b>	nízká	střední	dobrá
<b>Produktivita</b>	dobrá	vysoká	střední
<b>Cena</b>	střední, standardní stroje, jsou nabízeny	velmi vysoká	vysoká
<b>Jiné vlastnosti</b>	použitelné také pro leštění šroubovic, odstraňování makročásteček, suché i mokré pískování	vhodné jen pro velké výrobce, nezbytná ochrana výrobků proti korozi	použitelné také pro leštění šroubovic, odstraňování mikročástic, demagnetizace je pak nezbytná

Tabulka 2-6 - Typy mechanických úprav povrchu nástroje 2 převzato z [XVII]

### 3. Návrh broušení šroubovitého monolitního vrtáku včetně návržení úprav mikrogeometrie a typu tenké vrstvy

V této kapitole bude uveden postup výroby šroubovitého vrtáku s kuželovým tvarem hřbetní plochy včetně návrhu úpravy mikrogeometrie a typu tenké vrstvy. Hřbetní plocha tvořená částí pláště kužele byla vybrána z důvodu snadnější výroby. Podnik, jež zabezpečuje broušení šroubovitých nástrojů v rámci této diplomové práce má s tímto tvarem hřbetních ploch dlouhodobé zkušenosti a je tedy schopen nástroje vyrobit v požadované přesnosti.

#### 3.1 Návrh konkrétních úhlů a úprav makrogeometrie

Teď je třeba se již zaměřit na konkrétní hodnoty nástrojových úhlů potřebných k nabroušení špičky nástroje. Jedná se o úhel hlavního hřbetu  $\alpha$ , úhel špičky  $\varepsilon$  a úhel stoupání šroubovice  $\omega$ . Informace byly čerpány z odborné literatury a poté konzultovány s některými z výrobců vrtáků určených k obrábění austenitických ocelí.

- **Úhel hlavního hřbetu  $\alpha$ :** Jak je vidět z tabulky 2 – 3, pohybuje se hodnota úhlu hřbetu pro různé materiály mezi 8 – 15°. Pro korozivzdorné austenitické oceli se běžně používá úhel v rozsahu 9 – 11°, přičemž je volena konkrétní hodnota 10°. Stejně tak jako u úhlu čela, tak i úhel hřbetu se může s poloměrem nástroje měnit. Záleží však na typu broušení špičky nástroje. Této změny lze příznivě využít k optimalizaci rezných vlastností nástroje.
- **Úhle stoupání šroubovice  $\omega$ :** Pro austenitické oceli udává literatura hodnotu úhlu stoupání šroubovice 30°. V tomto případě je geometrie vrtáku navrhovaného v této diplomové práci limitována roubíkem, ve kterém jsou připraveny chladicí kanálky se stoupáním pod úhlem 32,1°.
- **Úhel špičky  $\varepsilon$ :** Hodnota úhlu špičky vrtáku je navržena na 140°.

Úhel	Literatura/výrobci [°]	Zvolená hodnota [°]
Hlavního hřbetu	9 až 11	<b>10</b>
Stoupání šroubovice	30	<b>32,1</b>
Špičky nástroje	140	<b>140</b>

Tabulka 3-1 - Zvolené hodnoty

- Pro navrhovaný nástroj bude volena negativní faseta o šíři 0,1 mm s úhlem 30°.
- Pro navrhovaný nástroj bude použit tvarový průběh, jež se jeví pro tento typ obráběného materiálu jako nevhodnější. Vydutý tvar zhruba uprostřed ostří zaručuje lepší zařiznutí do houževnatého materiálu, lepší dělení třísky a její směřování do šroubovitě drážky nástroje.
- Příčný výbrus „Typ C“: úhel výbrusu 50° (sklon od roviny přísuvu  $P_p$ ), úhel pootočení od břitu 36°. Naznačení úhlů viz obrázky 2 – 18.
- Úhel negativní fasety - 30° (kótováno v rovině posuvové  $P_f$  od osy nástroje). Šíře fasety je 0,1 mm, požadovaná hodnota zaoblení, docílená pomocí úprav

mikrogeometrie, je 0,02 mm. Faseta broušena ručně pomocí pilníku, přičemž je nástroj upnut ve speciálním přípravku, který zaručuje dodržení úhlu fasety.

### 3.2 Návrh postupu broušení šroubovitého vrtáku

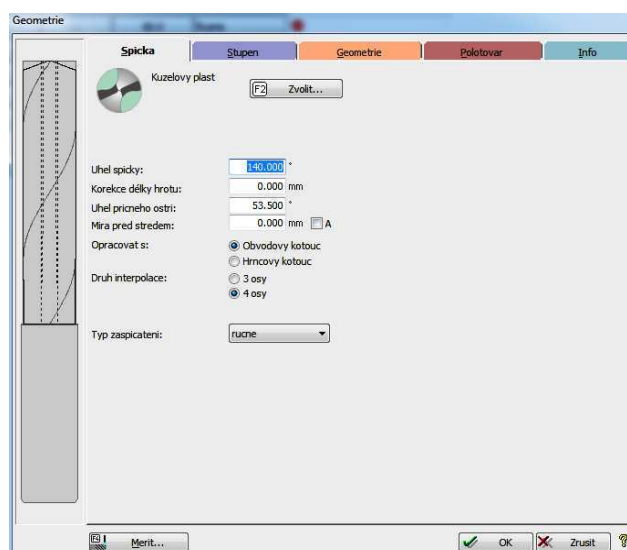
Návrh postupu pro broušení nástroje byl proveden pomocí softwaru NUMROTOplus, jež byl charakterizován již v kapitole 2.1. Práce probíhala mimo stroj na osobním počítači, z kterého byla následně data přenesena do operačního systému 5-ti osé NC brusky WALTER s CNC řízením.

Postup broušení nástroje je složen z několika dílčích operací, jež budou jmenovitě zobrazeny níže na již hotovém nástroji. Hlavním předmětem návrhu v této diplomové práci je však špička nástroje. Z požadavků na tvaru nástroje plynoucích ze závěrů z rešeršní, byly navrženy následující podmínky pro broušení hrotu nástroje:

- úhel špičky nástroje:  $\varepsilon = 140^\circ$
- úhel příčného ostří:  $\psi = 53,5^\circ$
- tvar brusného kotouče: obvodový
- počet os: 4

Doplňující parametry nezbytné pro definici kuželového pláště tvořících kuželů:

- úhel hlavního hřbetu:  $\alpha = 10^\circ$
- délka opracování: 80°
- prodloužení na začátku: 10°
- velikost koncového přesahu: 2 mm
- velikost koncového přesahu: 1 mm
- korekce délkové polohy: 0,12 mm
- korekce úhlu špičky: 0°



Obr. 3-1 - Volba geometrie špičky

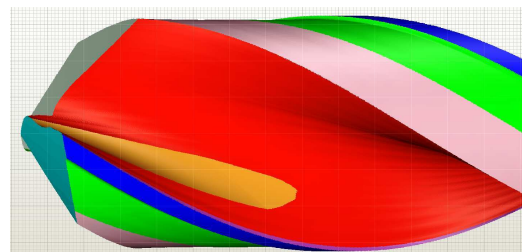
Možný počet os broušení při broušení hřbetu nástroje závisí na tvaru brusného kotouče. Byl zvolen obvodový kotouč se čtyřmi možnými osami broušení. Hlavní rozdíl mezi obvodovým a hrncovým kotoučem je vyšší trvanlivost obvodového oproti hrncovému



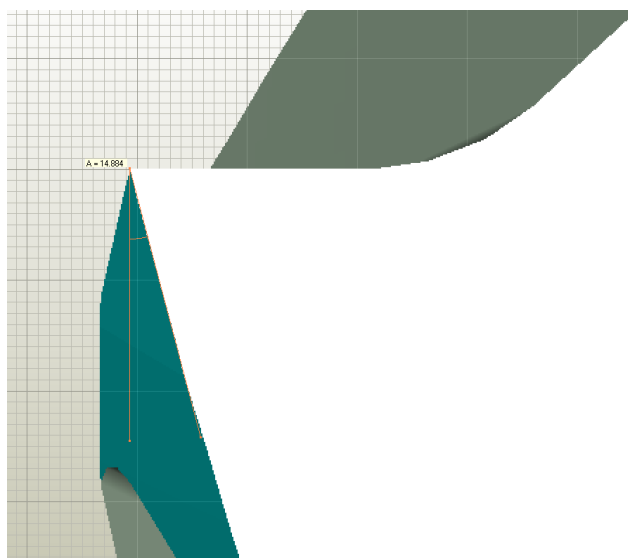
kotouči. Naproti tomu hrncový kotouč je více schopen přesněji dodržet požadovanou geometrii. Bylo docíleno hodnot úhlu hlavního hřbetu:

- úhel hřbetu na poloměru nástroje  $r_n = 0,5\text{mm}$  :  $\alpha_{0,5} = 14,884^\circ$
- úhel hřbetu na poloměru nástroje  $r_n = 6,5\text{mm}$  :  $\alpha_{6,5} = 10,4^\circ$

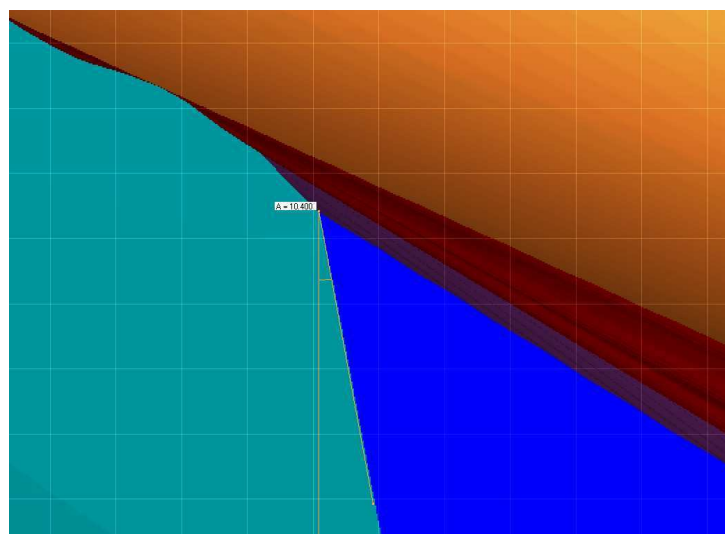
Požadované hodnoty hlavního úhlu hřbetu  $\alpha$  po dohodě s konzultantem byly  $15^\circ$  u špičky nástroje a  $10^\circ$ . S ohledem na přesnost broušení, tyto hodnoty vyhovují. Měření úhlů hlavního hřbetu probíhalo přímo v programu NUMROTOplus pomocí nástrojů k měření 2D rozměrů. Úhly byly měřeny v rovině posuvové  $P_f$  :



Obr. 3-2 - Pohled do posuvové roviny











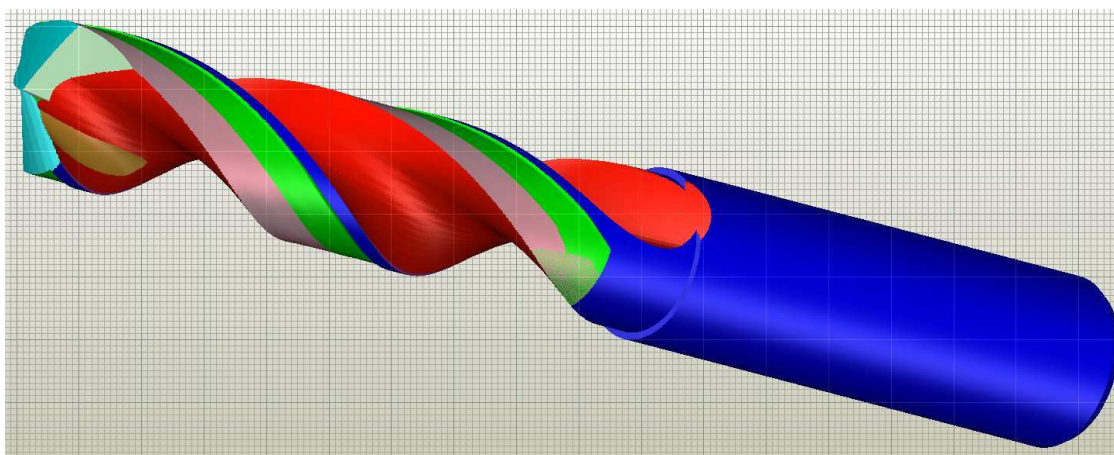
Obr. 3-3 - Pohled do řezu na poloměru 0,5 mm



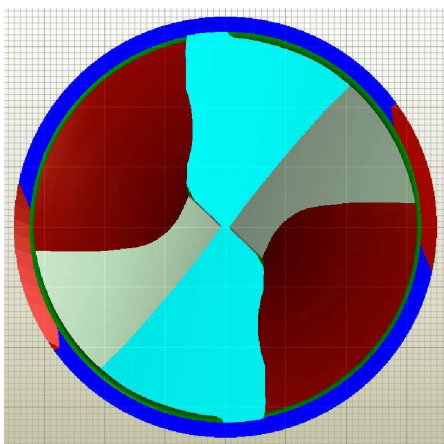
Obr. 3-4 - Pohled do roviny posuvové

Jednotlivé operace prováděné během broušení šroubovitého vrtáku dle barev:

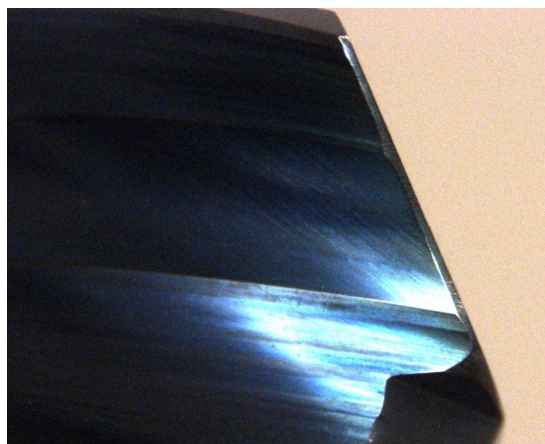
-  Původní tvar roubíku
-  Výbrus šroubovitě drážky: broušeno na jedno projetí brusného kotouče, nastaven úhel stoupání  $\omega = 32,1^\circ$ .
-  Výbrus drážky k docílení výsledného tvaru tvarového ostří
-  Podbroušení vedlejšího hřbetu
-  Druhé podbroušení vedlejšího hřbetu. Dáno kinematikou broušení – nutné pro přesné dodržení tvaru vedlejšího hřbetu.
-  Výbrus hřbetu
-  Odlehčení příčného ostří - příčný výbrus „Typ C“
-  Výbrus negativní fasety na hlavním ostří (viz obrázek 3- 7)



Obr. 3-5 - Izometrický pohled na hotový nástroj



Obr. 3-6 - Pohled do roviny přísluvu




Obr. 3-7 - Negativní faseta na hlavním ostří

### 3.3 Návrh druhu povrchové úpravy a typu deponované tenké vrstvy

- zpracováno s pomocí [24]

Aby bylo dosaženo vhodných podmínek pro depozici tenké vrstvy, bude nástroj strojně leštěn v omítacím médiu H4 400. Toto médium je složeno z několika složek: ořechové skořápky jako unášec abraziva, pasta HL7 a diamantový prach PP02 jako abrazivum s velikostí zrn 0,5 – 1 mm. Při leštění dojde k odstranění nečistot a ostrých přechodů pro broušení. Důvody zařazení této operace a výhody této úpravy již byly podrobněji popsány v podkapitole 2.6.

Po vyleštění bude nástroj opatřen tenkou vrstvou nACRo<sup>3</sup> deponovanou pomocí technologie TripleCoating. Jak již bylo uvedeno v podkapitole 2.3.1., jedná se o nanokompozitní vrstvu a modifikaci nACRo. Modifikace spočívá ve zlepšení vrstvy jako celku, nikoliv ve zlepšení jednotlivých složek vrstvy.

Název	Barva	Nanotvrdost [GPa]	Tloušťka [μm]	Koeficient tření	Max. teplota použitelnosti [°C]	Symbolická barva
nACRo <sup>3</sup> ®	Modro-šedá	40 / 34	1-5	0,35	1100 / 900	

Tabulka 3-2 - Vlastnosti navržené vrstvy převzato z [24]

Vrstva bude nedeponována pouze na špičku nástroje a zhruba 20 mm od špičky. I když po depozici opět proběhne leštění nástroje, hodnota součinitele smykového tření tenké vrstvy již neklesne na hodnotu součinitele smykového tření vyleštěného karbidu. Třísky se tedy teoreticky budou z otvoru šroubovou drážkou dostávat lépe, než kdyby byl nedeponován celý nástroj.

## 4. Ověření zvýšení řezivosti nástroje s navrženou úpravou

Cílem experimentu bylo porovnat řezivost navrženého nástroje s dalším typem nástroje používaného k obrábění korozivzdorných austenitických ocelí. Tento referenční nástroj je rozdílný ve tvaru hřbetních ploch, jež jsou vyrobeny plošným výbrusem. Hlavním hlediskem experimentu byla požadovaná trvanlivost, který byla zmíněna již v prvotních fázích návrhu nástroje. Jestliže by nebyla dodržena podmínka minimální trvanlivosti, byla by nutná změna makrogeometrie, popřípadě druhu tenké vrstvy či úprava mikrogeometrie. Pro experiment byly použity 2 zcela totožné nástroje navržené v předchozím textu a 2 poskytnuté referenční nástroje, taktéž stejné. Během experimentu byly sledovány a následně vyhodnoceny následující faktory:

- **Složky řezné síly a kroutící moment:**
  - kroutící moment  $M_c$  [Nm]
  - posuvová složka řezné síly  $F_f$  [N]
  - pasivní složka řezné síly  $F_p$  [N]
- **Trvanlivost nástroje** - měřena počtem vyrobených otvorů bez porušení nástroje
- **Opotřebení řezné a vodící části nástroje (fasetky)**
- **Jakost vyrobených otvorů**
  - otěpy na vstupu a výstupu vrtaného otvoru
  - střední aritmetickou drsnost povrchu  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ]
  - střední drsnost povrchu  $R_z$  [ $\mu\text{m}$ ]
- **Tvorba třísek**

### 4.1 Podmínky a průběh experimentu

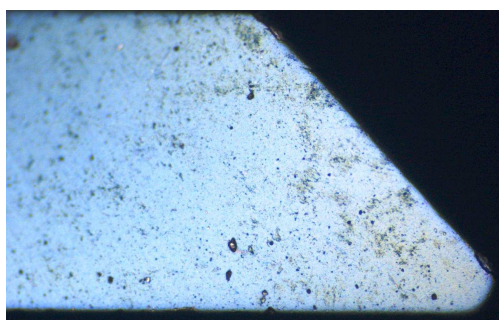
Technologie, jež byla použita, lze charakterizovat jako jednorázové vrtání průchozí díry o délce 8D bez výplachu a bez přerušování s vnitřním přívodem procesní kapaliny o konstantním tlaku 40 bar. Před začátkem samotného obrábění bylo nutné vypracovat výrobní výkres budoucích otvorů na obráběném polotovaru s přesně zaznamenanými souřadnicemi, které zaručí pozdější orientaci v jejich pořadí k měření drsnosti povrchu. Na samotný obrobek stačilo pouze vyznačit souřadný systém obrábění. Charakteristika použitých nástrojů:

- Dvoubřítý šroubovitý monolitní SK vrták
- :
  - Průměr nástroje:  $D_n = 13\text{mm}$
  - Pro hloubku otvoru:  $L = 8xD_n$
  - Minimální trvanlivost:  $T_{ot} = 36\text{otvorů}$
  - Tenká vrstva: nanokompozitní vrstva TripleCoatings Cr
  - Negativní ochranná faseta na hlavním ostří s úhlem -  $30^\circ$
  - Pravořezný
  - Vnitřní přívod kapaliny

	Navržený nástroj	Referenční nástroj
Úhel hlavního hřbetu [°]	10	10
Úhel stoupání šroubovice [°]	32,1	30
Úhel špičky [°]	140	140
Hřbetní plochy	Kužel	Plošky
Zaoblení ochranné fasety [μm]	20	10
Materiál	TSM 33 (Cerazit)	K30F (Cerazit)

**Tabulka 4-1 - Charakteristika použitých nástrojů**

Na nástrojích nebyly před experimentem zjištěny žádné viditelné vady, jež by mohly zapříčinit předčasné selhání nástroje. Stav povrchu nástroje po druhém leštění jsou patrné na následujících obrázcích:



**Obr. 4-1 - Stav obvodové fasety před obráběním**



**Obr. 4-2 - Stav ochranné fasety na hlavním ostří před obráběním**

Experiment byl proveden na 5-ti osém NC frézovacím centru s CNC řízením, jehož základní vlastnosti jsou:

- otáčky na vřetenu:  $n = 18000 \text{ min}^{-1}$
- výkon na vřetenu:  $P = 15 \text{ kW}$
- tlak středového chlazení: max 80 bar
- operační systém: Heidenhain  
iTNC 530



**Obr. 4-3 - Hermle C40U Dynamics**

Otáčky nástroje  $n = 860 \text{ min}^{-1}$  a posuv na otáčku  $f = 0,13 \text{ mm/ot}$  byl zvolen dle katalogových hodnot doporučovaných pro referenční nástroj. Jako procesní kapalina byla použita olejová emulze Cimstar 620 – 7%, přiváděna do místa řezu pomocí vnitřních



chladících kanálků v nástroji. Tlak kapaliny byl konstantní na hodnotě 40 bar. Nástroje byly upnuty v hydroplastickém upínači SHUNK. Dbáno bylo vždy na stejné vyložení nástrojů, aby se zamezilo zkreslení výsledků vlivem proměnlivé tuhosti.



Obr. 4-4 - Upnutí nástroje

Během testování řezivosti jednotlivých vrtáků, tzn. při vrtání jednoho otvoru po druhém za daných podmínek pro všechny testované nástroje, byl pomocí čtyřsložkového dynamometru Kistler 9272 sledován vývoj řezných sil a momentů. Obrobek byl upnut v tříčelistovém sklíčidle, jež bylo přímo spojeno s dynamometrem. Měřicí rozsah přístroje, jež se nastavuje dle velikostí očekávaných sil a momentů byl nastaven na následujících hodnotách:

$$F_f \begin{matrix} +5000N \\ -500N \end{matrix},$$

$$F_p \begin{matrix} +5000N \\ -500N \end{matrix},$$

$$M_c \begin{matrix} +50Nm \\ -10Nm \end{matrix}$$



Obr. 4-5 - Upnutí obrobku v dynamometru

Materiál k obrábění byl dodán ve formě kruhové tyče z korozivzdorné austenitické oceli AISI 304 (ČSN 17 240), jež bylo nutné nadělit na pásové pile na dílčí vzorky o následujících parametrech a vlastnostech:

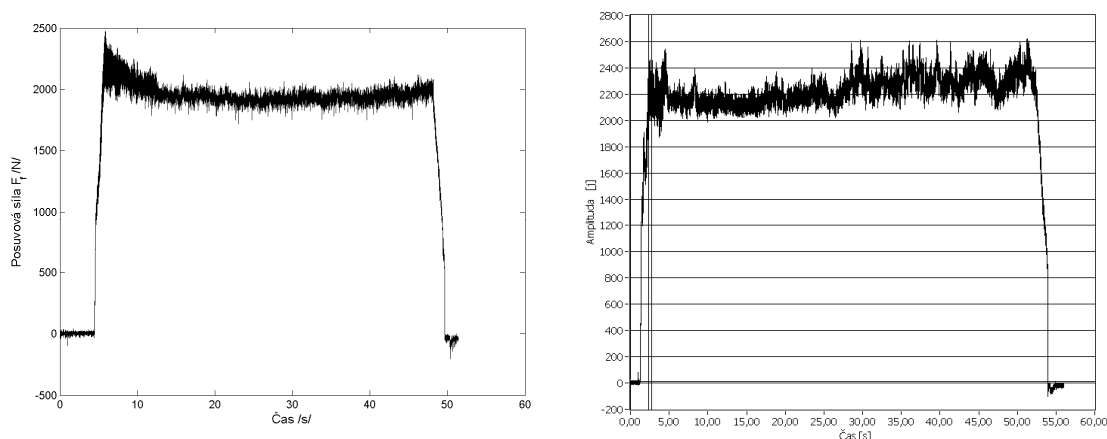
- průměr vzorku:  $D = 160mm$
- tloušťka vzorku:  $t = 96mm$
- pevnostní vlastnosti:  $R_m = 490 - 685MPa$  (mez pevnosti v tahu)

Opotřebení nástroje bylo kontrolováno po stejném počtu vyvrtaných otvorů, tento počet byl určen dle vývoje testování a hodnot vznikajících řezných sil. Tento počet byl po prvních pěti otvorech ustanoven na kontrolu po každých pěti otvorech. Kontrola probíhala opět pomocí dílenského mikroskopu. Proběhl sběr třísek, jejichž postupná změna mohla detekovat změnu podmínek obrábění, popřípadě nárůst opotřebení nástroje. Po ukončení testování na jednotlivých nástrojích proběhla konečná kontrola stavu nástrojů, sledování vzniku případných trhlin a opotřebení. Nakonec přišla na řadu jakost obrobených otvorů zaměřená na drsnost a přítomnost otrepů na výjezdu z otvoru.

## 4.2 Vyhodnocení sledovaných veličin

### 4.2.1 Řezné síly a momenty

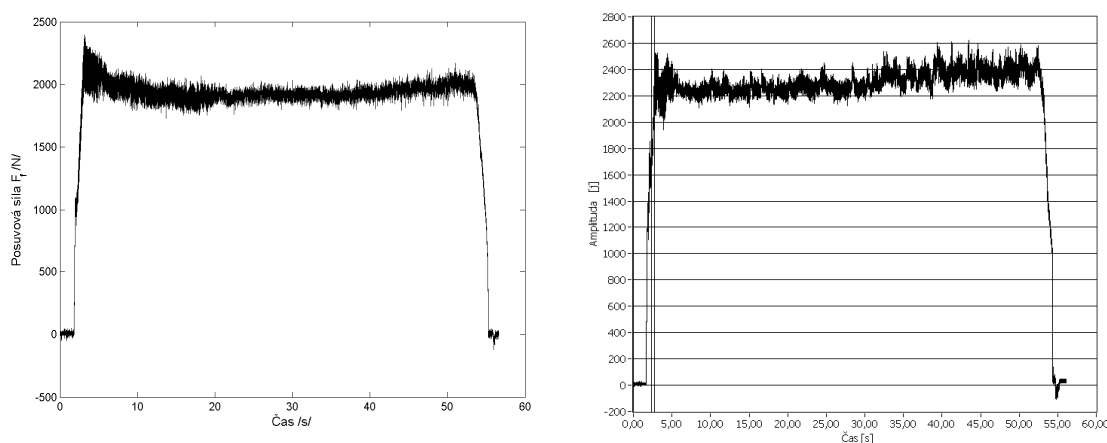
Jak již bylo řečeno, složky řezné síly a momenty byly měřeny pomocí dynamometru Kistler a vyhodnocovány pomocí softwaru LabView 8.2. Na následujících grafech jsou hodnoty a průběhy sledovaných veličin u příslušných otvorů vždy pro první navržený a pro první referenční nástroj. Shrnutí hodnot je uvedeno v tabulce 4 - 2 v podkapitole 4.3. Data vztahující se k dalším dvěma testovaným nástrojům jsou uvedeny v příloze č. 1.



Obr. 4-6 – Posuvová složka, otvor č. 1 – navržený nástroj (vlevo), referenční nástroj (vpravo)

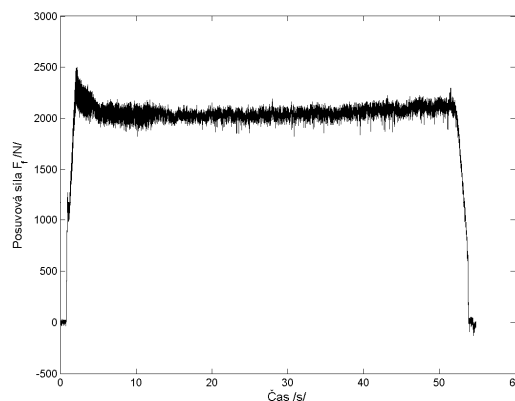
U navrženého nástroje bylo po vyvrtání prvního otvoru změřeno 1950N zatímco u referenčního 2250N. Průběh byl u navrženého nástroje viditelně hladší s poklesem sil po zaříznutí do určité hloubky.

U dvacátého čtvrtého otvoru bylo u navrženého nástroje změřeno 2200N a u referenčního 2300N. Posuvová složka řezné síly nepatrně narostla u obou nástrojů. Průběh byl u navrženého nástroje opět hladší s poklesem sil po zaříznutí do určité hloubky.



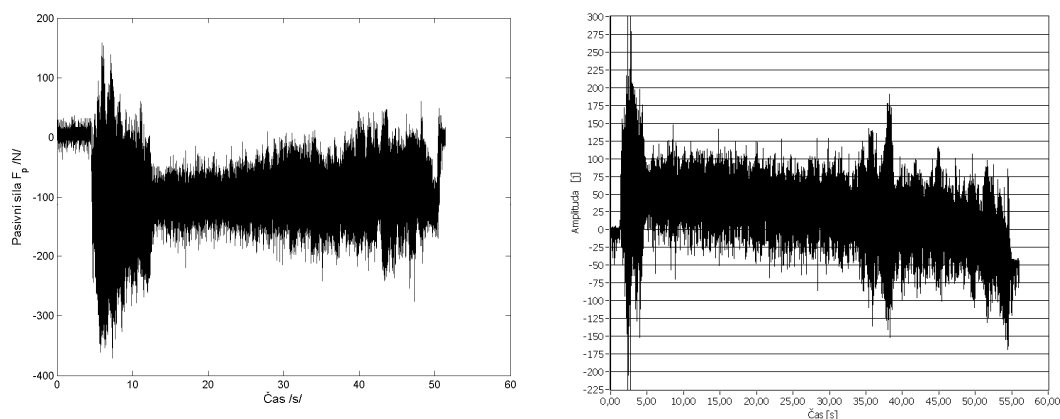
Obr. 4-7 – Posuvová složka, otvor č. 24 – navržený nástroj (vlevo), referenční nástroj (vpravo)

S prvním navrženým nástroje bylo celkem vyvrtáno 66 otvorů, přitom posuvová složka řezné síly se vyšplhala pouze na 2100N.



Obr. 4-8 – Posuvová složka, otvor č. 66 – navržený nástroj

První naměřená pasivní složka řezné síly navrženého nástroje se vyšplhala na 100N, zatímco u referenčního nástroje byla tato složka pouze 30N, ale s rostoucí tendencí

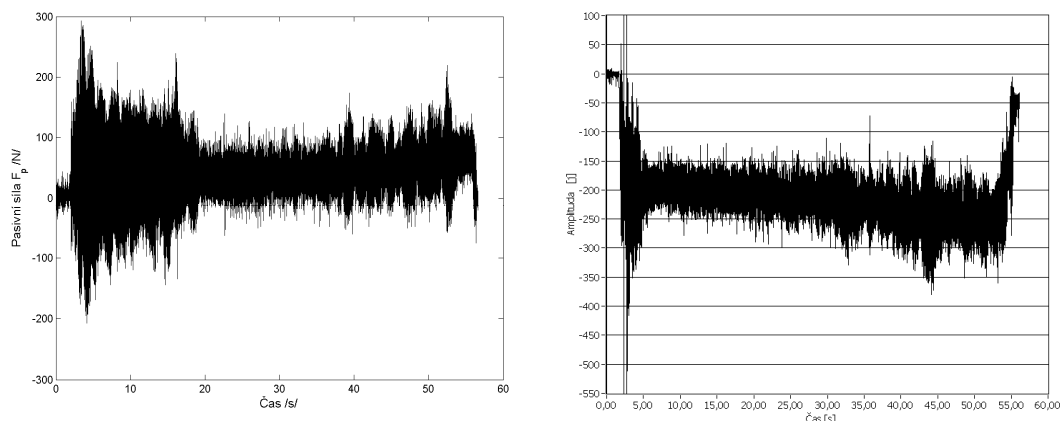


Obr. 4-9 – Pasivní složka, otvor č. 1 – navržený nástroj (vlevo), referenční nástroj (vpravo)

U dvacátého čtvrtého otvoru bylo u navrženého nástroje změřeno 50N a u referenčního 225N. Pasivní složka řezné síly u tohoto referenčního nástroje postupně s vyvrtanými otvory narůstala, přičemž u každého z náměrů se během změny hloubky otvoru zvětšovala.

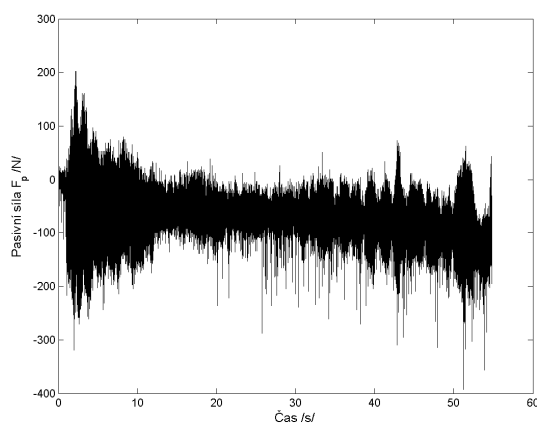
Z předešlých grafů je patrné, že hodnoty pasivní složky referenčního nástroje se dříve ustálily, avšak po ustálení je průběh navrženého nástroje hladší než u referenčního.



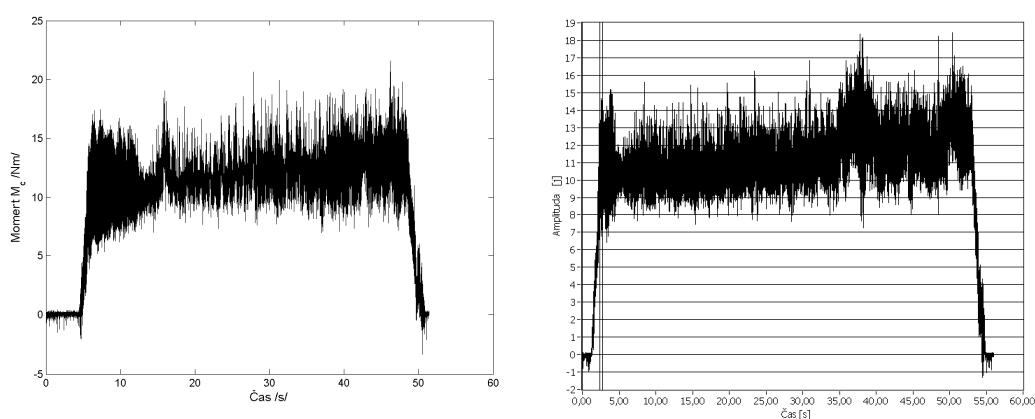


Obr. 4-10 – Pasivní složka, otvor č. 24 – navržený nástroj (vlevo), referenční nástroj (vpravo)

U šedesátého šestého otvoru bylo naměřeno u navrženého nástroje 75N již také s tendencí nárůstu hodnot během vrtání daného otvoru



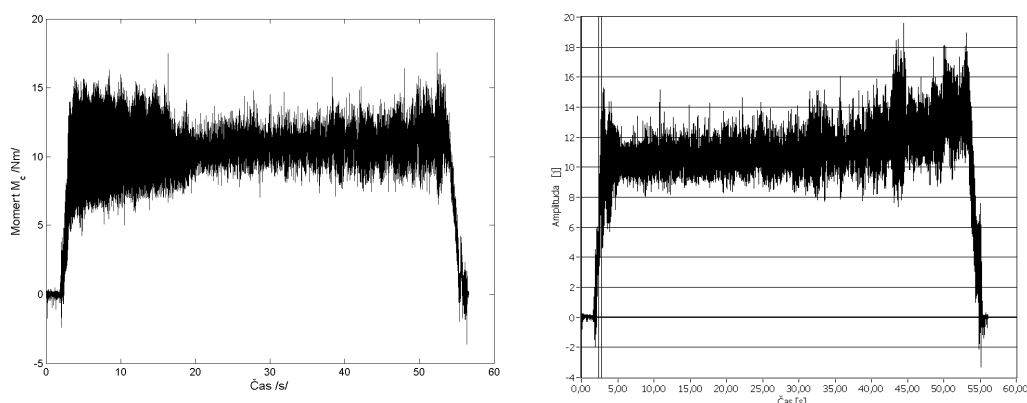
Obr. 4-11 – Pasivní složka, otvor č. 66 – navržený nástroj



Obr. 4-12 – Kroučící moment, otvor č. 1 – navržený nástroj (vlevo), referenční nástroj (vpravo)

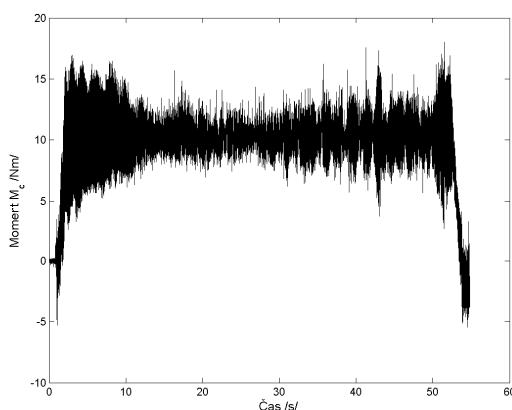
Na obrázku 4 – 12 je možno vidět průběh a hodnota kroučícího momentu během vrtání prvního otvoru opět u prvního navrženého a prvního referenčního nástroje. Průběh u obou nástrojů je podobný. Má rostoucí tendenci a maximální rozptyl se pohybuje kolem 7 Nm. U navrženého vrtáku bylo naměřeno 12 Nm a u referenčního 11Nm.

Na obrázku 4 – 13 jsou hodnoty z otvoru č. 24, kde se již moment u navrženého nástroje poklesl na průměrných 11Nm a u referenčního naopak vzrostl na 12Nm, přičemž vzrůstající tendence momentu s hloubkou otvoru zůstává.



**Obr. 4-13 - Kroučící moment, otvor č. 24 – navržený nástroj (vlevo), referenční nástroj (vpravo)**

U šedesátého šestého otvoru bylo naměřeno u navrženého nástroje opět 11Nm s téměř totožným průběhem.

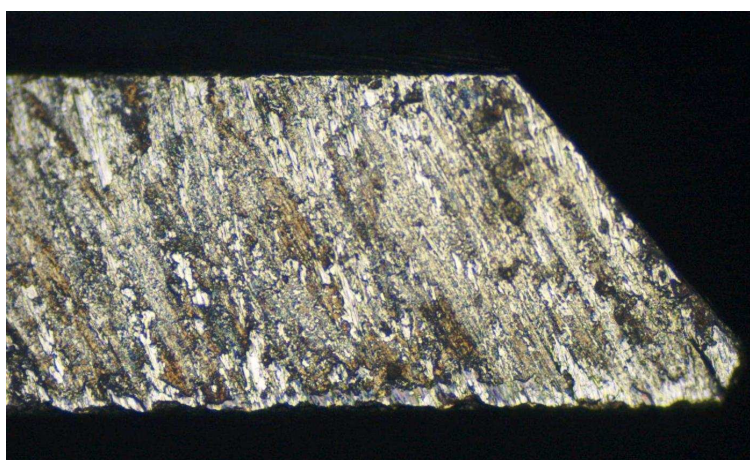
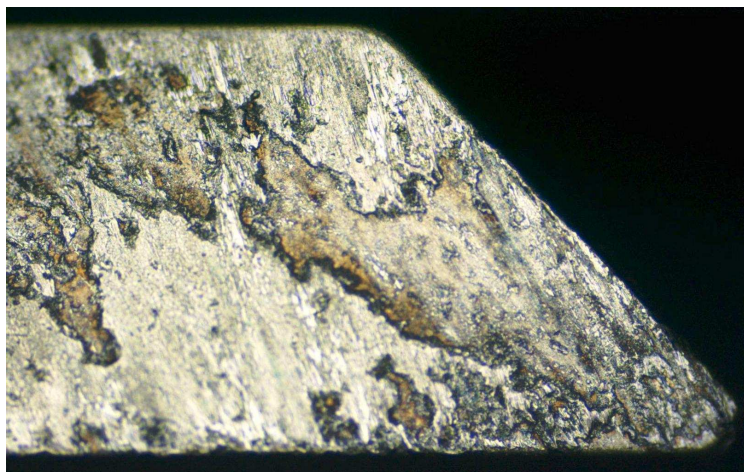


**Obr. 4-14 Obr. 4-15 – Kroučící moment, otvor č. 66 – navržený nástroj**

#### 4.2.2 Opatření břitů

Stav opotřebení byl sledován pomocí univerzálního dílenského mikroskopu NIKON SMZ 645. Ke sledování opotřebení byla vybrána obvodová faseta a ochranná negativní faseta na hlavním ostří, jelikož se předpokládá největší rozvoj opotřebení na těchto nejvíce zatěžovaných místech nástroje. Jelikož během experimentu nedošlo k předčasnému defektu u žádného z nástrojů, a opotřebení narůstalo téměř nepatrně s počtem vyrobených otvorů, byly pro účely zpracování této diplomové práce vzaty konečné stavy nástrojů. Fotografie opotřebení vztahující se k dalším dvěma testovaným nástrojům jsou uvedeny v příloze č. 2.

Na obvodové fasetě jsou kromě rozsáhlých nárůstků k vidění po dvaceti čtyřech otvorech opotřebení hrany na obvodu fasety – horizontální hrana na následujících obrázcích. U referenčního nástroje jsou vidět rozsáhlejší vyštípnuté oblasti, kdežto u navrženého nástroje jsou nerovnosti na obvodu fasety tvořeny převážně stabilní váznuou vrstvou.



**Obr. 4-16 – Stav obvodové fasety, pravá strana, otvor č. 24 – navržený nástroj (nahore), referenční nástroj (dole)**



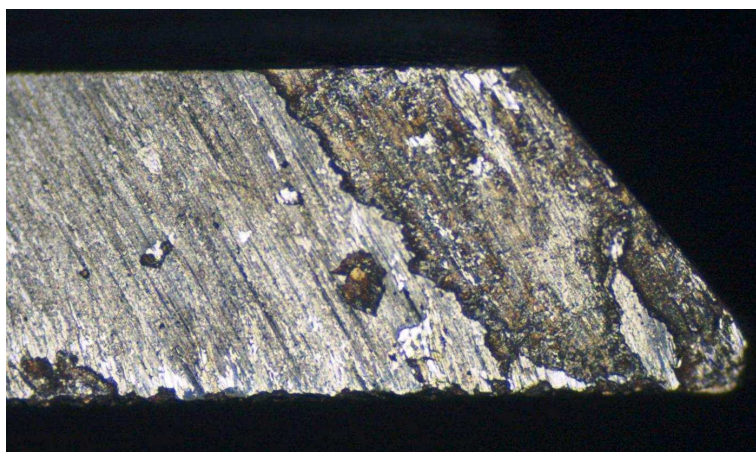
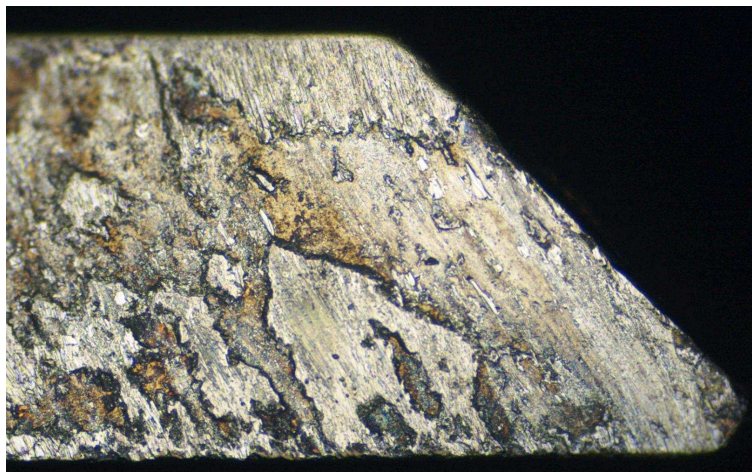
**Obr. 4-17 Obr. 4-18 – Stav obvodové fasety, pravá strana, otvor č. 66 – navržený nástroj**

Obvodová faseta pravé strany nástroje vypadá po otvoru č. 66 téměř bez rozdílu v porovnání s otvorem č. 24.

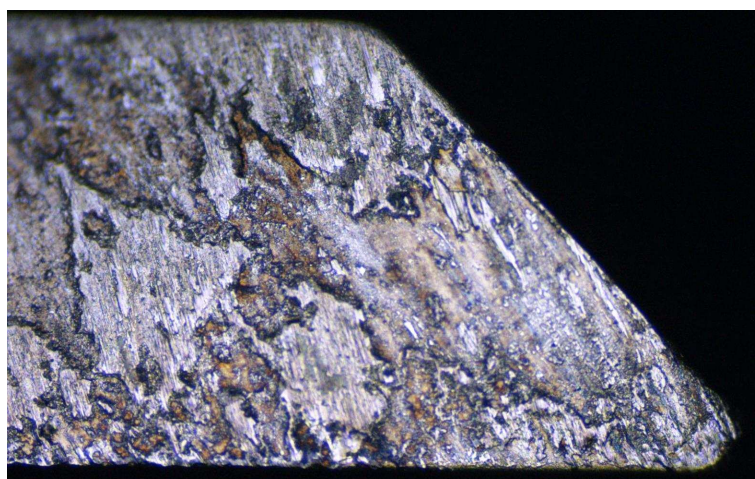
U levé strany ostří je situace téměř totožná. U referenčního nástroje je vidět rozsáhlejší poškození obvodové části nástroje. Na obrázku 4 – 20 je opět vidět,



že poškození fasety navrženého nástroje se po šedesáti šesti otvorech nijak rapidně nezhoršilo.



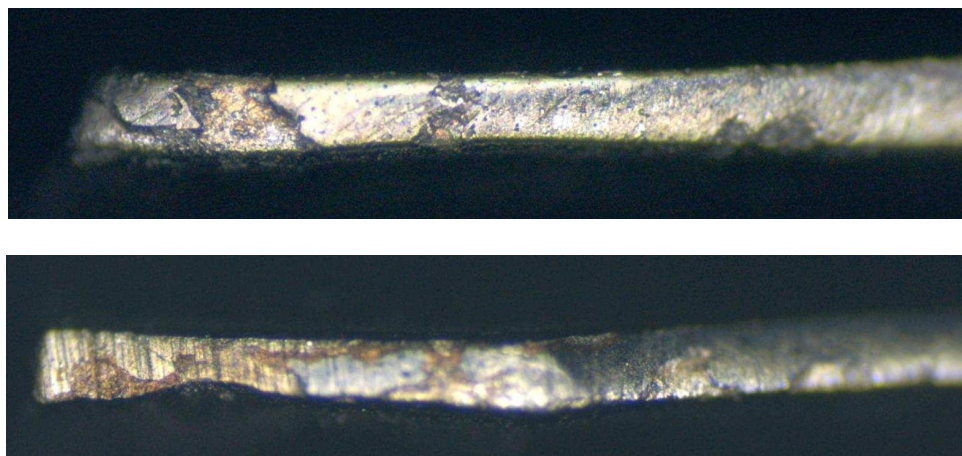
Obr. 4-19 – Stav obvodové fasety, levá strana, otvor č. 24 – navržený nástroj (nahore), referenční nástroj (dole)



Obr. 4-20 – Stav obvodové fasety, levá strana, otvor č. 66 – navržený nástroj

U ochranné fasety na hlavním ostří nastává podobná situace jako u obvodové fasety. Tmavší ploška viditelná na spodní hraně ostří je ochranná faseta a tmavěji zabarvená plocha na ostří opět oblasti stabilního nárůstku chránící břit. U referenčního nástroje

je po otvoru č. 24 jasně viditelná část (více vlevo), kde je ochranná faseta vyštípnuta. Stav ochranné fasety u navrženého nástroje je u šedesátého šestého otvoru téměř totožný s otvorem č. 24 téhož nástroje.

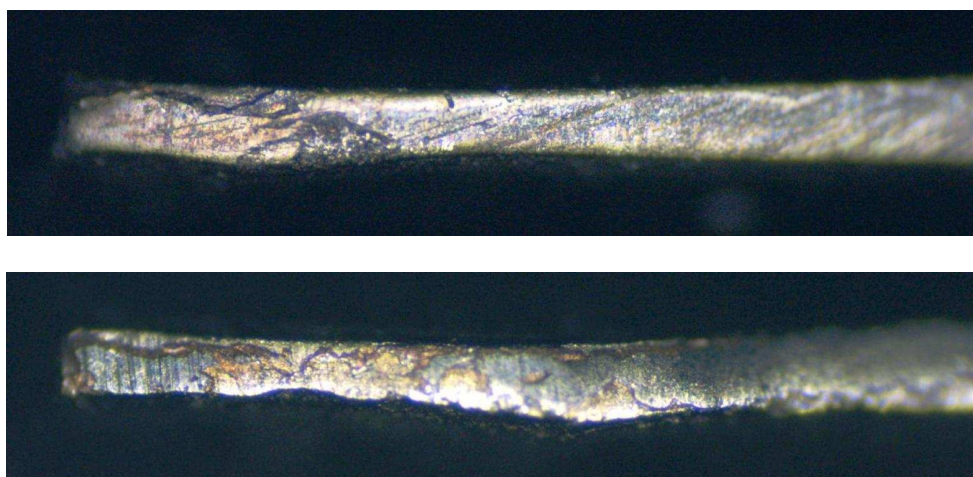


**Obr. 4-21 – Stav ochranné fasety na hlavním ostří, pravá strana, otvor č. 24 – navržený nástroj (nahore), referenční nástroj (dole)**



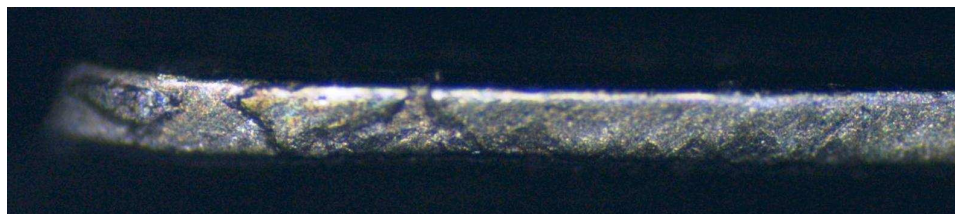
**Obr. 4-22 – Stav ochranné fasety na hlavním ostří, pravá strana, otvor č. 66 – navržený nástroj**

U levé strany nastává opět totožná situace jako u pravé. Viditelné poškození nastává pouze u referenčního nástroje. Z uvedených fotografií je tudíž jasné, že při dodržení stejných podmínek obrábění se referenční nástroj opotřebovává rychleji než ten navržený.



**Obr. 4-23 – Stav ochranné fasety na hlavním ostří, levá strana, otvor č. 24 – navržený nástroj (nahore), referenční nástroj (dole)**



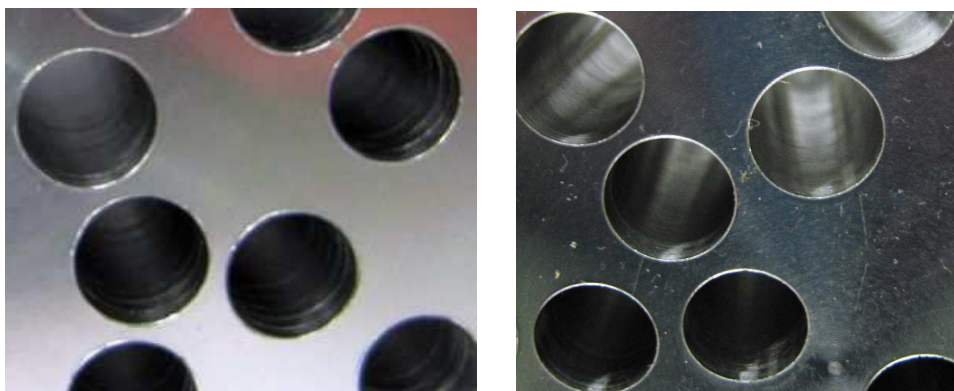


Obr. 4-24 – Stav ochranné fasety na hlavním ostří, levá strana, otvor č. 66 – navržený nástroj

### 4.2.3 Jakost otvorů

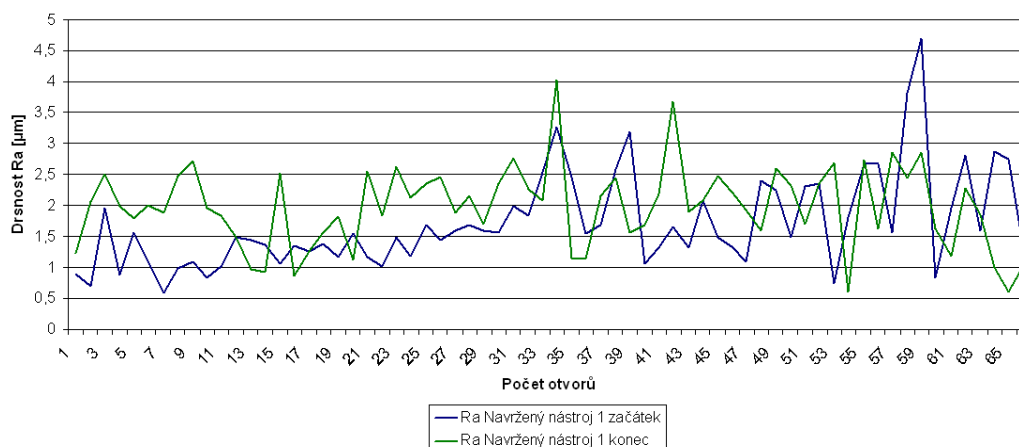
Z hlediska jakosti jsou sledovány otřepy na horní a spodní straně obrobku a drsnost obrobené plochy. Jak je vidět na detailech otvorů z obrázku 4 – 25, otřepy nejsou nijak neobvyklé pro tuto technologii obrábění. Otřepy byly totožné jak pro navržený, tak pro referenční nástroj.

Problémem je však spirálová drážka u horní strany obrobku, která vzniká při zpětném pohybu nástroje z otvoru zhruba 20 mm od začátku otvoru. Drážka vzniká během stažení otvoru při výjezdu nástroje. Jak již bylo zmíněno v rešeršní části této práce, řešením by mohlo být vypnutí rotace při zpětném pohybu nástroje.



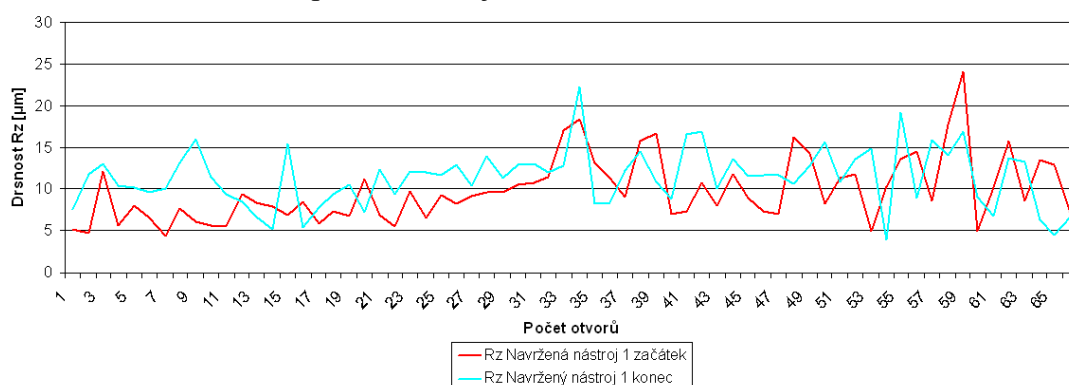
Obr. 4-25 – Otřepy na horní (vlevo) a spodní straně obrobku (vpravo)

Pomocí přenosného drsnoměru MarSurf M300 byla změřena střední aritmetickou drsnost povrchu  $R_a$  a střední drsnost povrchu  $R_z$  pro všechny čtyři použité nástroje. Průběh naměřených hodnot pro první navržený a první referenční nástroj je patrný v následujících grafech. Grafy k dalším dvěma testovaným nástrojům jsou uvedeny v příloze č. 3.

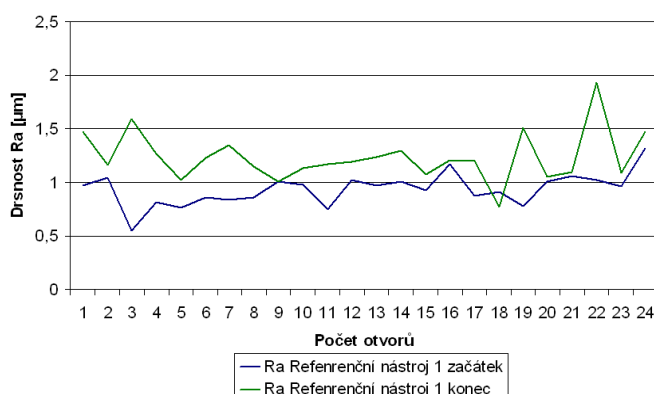


Obr. 4-26 - Průběh střední aritmetické drsnosti  $R_a$  u prvního navrženého nástroje

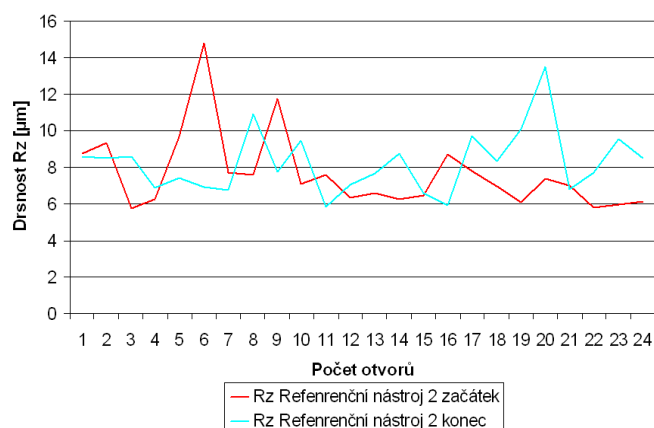
Řezné podmínky a intenzita rozpadání stabilní váz noucí vrstvy jsou jedny z hlavních vlivů, které určují výslednou jakost vyvrtaných otvorů. Zvolené řezné podmínky použité pro experiment, jsou v kombinaci s používáním celokarbidových šroubovitých nástrojů charakterizovány již jako podmínky pro obrábění na čisto. Střední aritmetická drsnost povrchu se v tomto případě pohybuje mezi  $R_a = 1,6 - 6,3 \mu m$ . Z tohoto pohledu se dosažená střední aritmetická drsnost jeví jako vyhovující. Jak je ale vidět, ani na jednom z uvedených grafů není patrný jednoznačný nárůst drsnosti s počtem vyvrtaných otvorů. To může být způsobeno nedostatečným opotřebením břitu, jež by se začalo projevovat na bezproblémovém průběhu procesu obrábění a tím pádem nepřímo na jakosti otvoru. Rozpadající se nárůstek a třísky mohou být dále plasticky tvářeny a nalepovány na stěny otvoru, což má za následek proměnlivou jakost otvoru.



Obr. 4-27 - Průběh střední drsnosti Rz u prvního navrženého nástroje



Obr. 4-28 - Průběh střední aritmetické drsnosti Ra u prvního referenčního nástroje



Obr. 4-29 - Průběh střední drsnosti Rz u prvního referenčního nástroje

#### 4.2.4 Tvorba třísky

Tvar třísek a jejich bezproblémové vyplavování z místa řezu je důležitý pro bezporuchový průběh obrábění, zabránění porušení břitu a v neposlední řadě obrobeného povrchu. Dle ISO třídění třísek, byly během obrábění sledovány dva druhy třísek: Obloučkovité třísky dělené (viz vzorek 1) a kuželovité šroubovitě třísky krátké (viz vzorek 2). Tento druh třísek byl sledován u všech čtyř nástrojů nehledě na počet již vyvrtaných otvorů. Pokud by docházelo k tvorbě dlouhých třísek, bylo by třeba zvážit změnu tvaru hlavního ostří, jež má hlavní vliv na tvar a dělení třísek.



Obr. 4-30 - Vzorek 1



Obr. 4-31 - Vzorek 2

### 4.3 Diskuse výsledků

- zpracováno s pomocí [7]

V následujícím textu budou bodově shrnuty poznatky, jež byly shromážděny v průběhu experimentální části diplomové práce.

- Vyšší naměřené hodnoty složek řezné síly a kroutícího momentu u referenčního nástroje (viz tabulka 4 – 2).
- Vyšší intenzita opotřebovávání referenčních nástrojů – první navržený nástroj nedosahuje ani po šedesáti šesti otvorech takového opotřebení (vyštípávání hran) na obvodové ani na ochranné fasetě jako ten referenční.
- U navržených nástrojů je výraznější opotřebení obvodové fasety oproti fasetě ochranné.
- Intenzita tvoření nárůstků na hlavním i vedlejším hřbetu nástroje je přibližně stejná u všech čtyř testovaných nástrojů.
- Tvar a velikost otřepů na obou koncích otvorů je stejná u všech čtyř testovaných nástrojů.
- Vyhovující střední aritmetická drsnost obrobené plochy.
- Lámání třísky a její tvar opět stejný jak pro navržené tak i pro referenční nástroje.

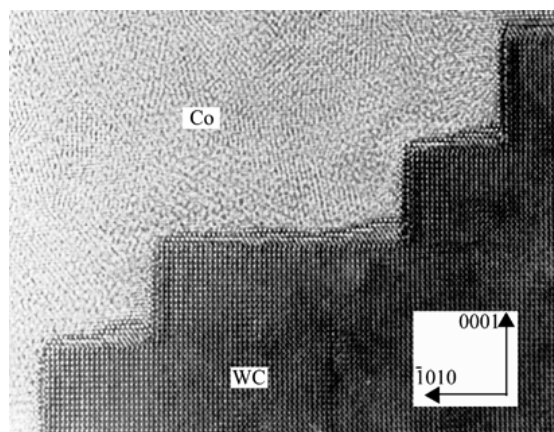
Z uvedeného je jasné, že navržené nástroje lépe obstály v navrženém experimentu z hlediska velikosti a velikosti nárůstu hodnot složek řezných sil a momentů a dále z hlediska opotřebení. U referenčního nástroje docházelo k rychlejšímu vyštípování na obvodové i ochranné fasetě. To může být způsobeno nejen vyššími hodnotami sil, ale také pevnostními hodnotami řezného materiálu. Navržený nástroj, jež je vyroben z karbidu TSM 33 a má hodnotu součinitele lomové houževnatosti, kterou udává výrobce substrátu, je  $K_{IC} = 9,4 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ . Mechanické charakteristiky karbidů byly konzultovány



s Bc. Zbyňkem Špiritem, který tvrdí, že materiál referenčního nástroje K30F, jež má takřka stejné chemické složení, bude mít tím pádem i hodnotu tohoto součinitele lomové houževnatosti udávané výrobcem. Tuto hodnotu se nepovedlo ověřit, byly ale Bc. Špiritem provedeny testy lomové houževnatosti TSM 33, u kterého vyšel součinitel lomové houževnatosti  $K_{IC} = 10,47 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ . To je hodnota o  $1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  vyšší, než udává výrobce TSM 33 a tedy i teoreticky vyšší, než má karbid K30F. Nižší hodnota lomové houževnatosti má v důsledku vliv na intenzitu výskytu křehkých lomů a tím pádem i na výsledné opotřebení.

Vyšší houževnatost TSM 33 je dána přítomností karbidu niobu, jež tvoří kolem karbidu wolframu tzv. obálky a zvyšuje tak odolnost materiálu proti šíření trhliny. Tento efekt se odborníky z praxe nazývá „Treppeneffekt“ a dovoluje použití jemnozrnného slinutého karbidu pro výrobu šroubovitých nástrojů, jež má po broušení lepší povrch. Jelikož byly nástroje testovány za stejných podmínek, lze zanedbat vliv dynamických sil a tepelných jevů na intenzitu vyštipování obvodových a ochranných fasetek u porovnávaných nástrojů.

Intenzivnější vyštipování ochranné fasety na hlavním ostří u referenčních nástrojů může být způsobeno rozdílnou hodnotou zaoblení negativní fasety. Referenční nástroj má nižší velikost zaoblení o 10  $\mu\text{m}$ . Je tedy „ostřejší“, což může mít vliv na nižší soudržnost tenké vrstvy a substrátu. Nižší soudržnost vede k porušení vrstvy a tím pádem k porušení substrátu.



Obr. 4-32 - Obálky NbC tvořené okolo WC převzato z [7]

Testované nástroje	Sledované hodnoty	Otvor č.		
		1	24	66
1. Navržený nástroj	$F_f$ [N]	1950	2000	2100
	$F_p$ [N]	100	50	75
	$M_c$ [Nm]	12	11	11
2. Navržený nástroj	$F_f$ [N]	1850	2000	-
	$F_p$ [N]	60	80	-
	$M_c$ [Nm]	9	10	-
1. Referenční nástroj	$F_f$ [N]	2250	2300	-
	$F_p$ [N]	30	225	-
	$M_c$ [Nm]	11	12	-
2. Referenční nástroj	$F_f$ [N]	2400	2500	-
	$F_p$ [N]	100	225	-
	$M_c$ [Nm]	11	12	-

Tabulka 4-2 - Naměřené hodnoty složek řezných sil a kroutícího momentu

Jak již bylo řečeno, ani u jednoho z nástrojů nedošlo během testování k náhlému selhání, přičemž u prvního navrženého nástroje nebyly ani u otvoru č. 66 patrné rozvíjející se nadměrné známky opotřebení. Je tedy otázkou, jaká by byla konečná trvanlivost navrženého nástroje. Tato informace se již nepodařila zjistit, neboť experimentům bylo přiděleno omezené množství materiálu k testování. Základní požadavek na trvanlivost diplomovou prací navrženého nástroje byl však splněn.

Dle uvedených grafů drsností je patrné, že během srovnatelného počtu vyvrtaných otvorů referenční nástroj nedosahoval tak vysokých hodnot střední aritmetické a střední drsnosti. V dnešní době již ale tyto údaje ne zcela vypovídají o kvalitě vyvrtaného otvoru. Pro lepší posouzení jakosti otvorů by bylo třeba změřit plošnou drsnost otvoru. Protože tyto měření ale nebyly v této fázi návrhu podstatné, nebyla jim věnována pozornost.

## 5. Technicko ekonomické zhodnocení

Základním požadavkem úspěchu navrženého nástroje byla minimální trvanlivost. Od nástroje se požadovalo zhotovení minimálně 36 otvorů. Nástroj nejenže tento základní požadavek splnil, ale byl schopen s nesrovnatelným konečným opotřebením na obvodové a ochranné fasetě vyrobit téměř trojnásobný v porovnání s referenčním nástrojem. Na první pohled je tedy jasné, že hlavní technologický přínos nového řešení je trvanlivost. Zatímco první navržený nástroj byl schopen bez závažnějšího poškození zhotovit šedesát šest otvorů, u obou referenčních nástrojů bylo již u otvoru č. 24 viditelné jasné opotřebením na obou fasetách. Stejná situace se opakovala víceméně i u druhých testovaných nástrojů s tím, že druhý navržený nástroj byl sledován pouze na dvaceti čtyřech otvorech (viz přílohy). V současné fázi řešení této problematiky ale nelze zcela přesně vyčíslit konečný ekonomický přínos, neboť docílený počet vyvrtaných otvorů by byl u všech testovaných nástrojů zajisté vyšší.

Nicméně pokud by se dosažené trvanlivosti brali jako definitivní při daném stupni opotřebením, bylo by možné vypočítat z následujících údajů níže uvedené ukazatele:

- Prodejní cena referenčního nástroje:	$PC_{ref} = 8000Kč$
- Prodejní cena navrženého nástroje:	$PC_{nav} = 4500Kč$
- Trvanlivost nástrojů při konkrétním opotřebením:	
- Referenční nástroj:	$T_{ref} = 24otvorů$
- Navržený nástroj:	$T_{nav} = 66otvorů$

Z uvedených údajů je možné určit následující ukazatele:

- Ukazatel intenzivního využití nástroje:	$k_i = \frac{V_s}{V_p} = \frac{24}{66} = 0,364$
---	---

Ukazatel intenzivního využití referenčního nástroje neboli také procentní vyjádření výkonnosti nástroje je 36,4 % oproti navrženému nástroji.

- Porovnání pořizovacích cen nástrojů: Prodejní cena navrženého nástroje zahrnující veškeré náklady na materiál, výrobu, režie a dále i zisk je 56,25 % prodejní ceny referenčního nástroje.

Z uvedeného je již jasné, že při použití stejných podmínek obrábění (stroj, řezné podmínky, procesní kapalina atd.) u obou nástrojů, je výhodnější nákup navrženého nástroje. Pro lepší představu peněžní úspory při použití navrženého nástroje by bylo třeba spočítat náklady na výrobu daného počtu děr. Není však předem dáno, jaký počet otvorů a za jaké náklady, jež jsou dány režii výroby, bude navržený zhotovovat.

Bude tedy dán teoretický příklad nasazení obou nástrojů při výrobě  $q = 100$  otvorů. Nejprve je třeba vypočítat variabilní náklady na výrobu daného počtu otvorů. Variabilní náklady jsou v podstatě režijní náklady výroby zahrnující například náklady na provoz strojů, údržbu nástrojů, energie či platy technicko-organizačních pracovníků atd. K výpočtu tohoto teoretického příkladu se pro zjednodušení bude počítat pouze s režijními náklady na nasazený nástroj:

$$NN = \sum_{i=1}^l (z_v NN_T)_i$$

kde:  $z_V$  ..... Počet výměn nástroje  
 $NN_T$  ..... Náklady na nástroj po dobu jedné trvanlivosti

Výpočet normy nákladů na nástroj po dobu jedné trvanlivosti se odvíjí v případě monolitního šroubovitého vrtáku hlavně na uvedení nástroje do původního stavu. Tedy do stavu před otupením pomocí přebroušení opotřebené oblasti, leštění před depozicí, depozicí a leštěním po depozici. Do nákladů na přebroušení je třeba započítat například strojní hodinové sazby stroje, mzdy pracovníka, režijní náklady ostřírny, náklady na depozici a leštění. Protože uvedené náklady jsou individuální a tento teoretický příklad nemá pevně dané hodnoty, bude dále počítáno pouze s náklady na depozici a leštění. Náklady se na nanesení nové multivrstvy u nástrojů průměru 10 mm průměrně pohybují cca kolem 200 Kč, přičemž leštění je již započteno v ceně. Do výpočtu nebude zahrnut fakt, že po přebroušení již nástroj teoreticky ztrácí 50% své trvanlivosti, neboť tuto informaci se nepodařilo ověřit.

Z uvedeného tedy vyplývají náklady na nástroj následovně:

$$NN_{\text{navržený}} = z_{V\text{navržený}} \cdot NN_T = 1 \cdot 200 = \underline{200\text{Kč}}$$

$$NN_{\text{referenční}} = z_{V\text{referenční}} \cdot NN_T = 4 \cdot 200 = \underline{800\text{Kč}}$$

Teď již zbývá vypočítat celkové náklady na výrobu sta otvorů navrženým a referenčním nástrojem. Celkové náklady se skládají z již zmíněných nákladů a fixních, jež představují nákupní cenu nástrojů.

$$CN_{\text{navržený}} = FN_{\text{navržený}} + VN_{\text{navržený}} = 4500 + 200 = \underline{4700\text{Kč}}$$

$$CN_{\text{referenční}} = FN_{\text{referenční}} + VN_{\text{referenční}} = 8000 + 800 = \underline{8800\text{Kč}}$$

U tohoto teoretického příkladu je jasné vidět peněžní úspora při použití navrženého nástroje v této diplomové práci. Úspora činí 4100 Kč.

## 6. Závěr

V této diplomové práci byl proveden konstrukční návrh a návrh typu broušení šroubovitého monolitního vrtáku, který by měl být v reálných podmínkách použit k obrábění korozivzdorných austenitických ocelí. Aby volba vybraných konstrukčních prvků špičky nástroje a dále hodnoty všech úhlů navrhované makrogeometrie byly opodstatněné, byl proveden rešeršní rozbor obráběného materiálu a nástrojů již v praxi používaných k obrábění daného druhu materiálu. Po zvolení konkrétních hodnot úhlů a konstrukčních prvků, byl v softwaru NUMROTOPlus, který je používá u NC brusek s CNC řízením, zpracován postup broušení šroubovitého vrtáku. Vedle koncepce makrogeometrie bylo třeba zvolit řezný materiál a případnou povrchovou úpravu. Jako řezný materiál byl zvolen slinutý karbid TSM 33 nadeponovaný tenkou vrstvou nACRo<sup>3</sup>. Jak po samotném vybroušení nástroje, tak i po depozici byl navržený nástroj leštěn v omítacím granulátu pomocí diamantových brusných zrn.

Pro experiment byly fyzicky zhotoveny dva navržené nástroje, jež byly srovnány za totožných reálných podmínek s dvěma referenčními nástroji. Hlavními rozdíly mezi navrženým a referenčním nástrojem byly v tvořících plochách a řezném materiálu. Zatímco hlavní hřbet konstruovaného nástroj je tvořen kuželovým pláštěm, hlavní hřbet referenčního nástroje je složen z vybroušených plošek. Dalším rozdílem byl typ řezného materiálu. Zatímco navržený nástroj byl vyroben z již zmíněného karbidu TSM 33, referenční z karbidu K30F.

Po vyhodnocení experimentální části bylo zjištěno, že u referenčních nástrojů bylo dosaženo větších hodnot složek řezných sil i momentů. U posuvové složky o 300 – 500 N, pasivní o 145 – 175 N a u momentů byly hodnoty větší o 1 – 2 Nm. Také co se týče opotřebení, byl na tom navržený nástroj podstatně lépe. Bylo sledováno opotřebení na ochranné fasetě hlavního ostří a na obvodové fasetě, neboť na těchto místech se očekával největší nárůst opotřebení. U první navrženého vrtáku, který bez defektu zhotovil šedesát šest otvorů vyhovující jakosti, nebylo zdaleka zjištěno takové opotřebení jako u referenčního nástroje, který bez defektu a též s vyhovující jakostí zhotovil dvacet čtyři otvorů. Tímto se naplno projevilo rozdíly mezi řeznými materiály. Karbid TSM 33 se jeví jako výhodnější z důvodu vyšší houževnatosti vlivem Treppeneffektu, který brzdí šíření trhlin a zmenšuje tak tvorbu křehkých lomů. Tímto byl splněn základní požadavek, kterým byla minimální trvanlivost zhotovit třicet šest otvorů bez náhlého defektu.

Dalším směrem v řešení této problematiky by jistě mohla být optimalizace makrogeometrie v závislosti na použitém materiálu, povrchové úpravě či tenké vrstvě. Při splnění minimální trvanlivosti nástroje, se ale návrh v této fázi jeví jako úspěšný.

## Zdroje

### Literatura

- [1] ŘASA, Jaroslav, GABRIEL, Vladimír. *Strojírenská technologie 3 – 1.díl. Metody, stroje a nástroje obrábění*. 2. vyd. Praha: Scientia, pedagogické nakladatelství, 2005. 256 s. ISBN 80-7183-337-1.
- [2] ROUD, Pavel. *Konstrukce produktivních vrtacích nástrojů v systému CATIA V5*. Diplomová práce. Plzeň: 2009.
- [3] BRYCHTA, Josef, ČEP, Robert, SADÍLEK, Marek, PETŘKOVSKÁ, Lenka, NOVÁKOVÁ, Jana. *NOVÉ SMĚRY V PROGRESIVNÍM OBRÁBĚNÍ*. Učební text. Ostrava 2007. 251 str. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [4] ŘEHOŘ, Jan, *Teorie obrábění*, Skripta k předmětu KTO/TO.
- [5] KRÍŽ, Antonín, *Nástrojové materiály*, Podklady k předmětu KMM/MO.
- [6] HLUCHÝ, Miroslav, KOLOUCH, Jan. *Strojírenská technologie 1 – 1.díl. Nauka o materiálu*. 3., přepracované vyd. Praha: Scientia, pedagogické nakladatelství, 2002. 266 s. ISBN 80-7183-262-6.
- [7] KRÍŽ, Antonín, *Prášková metalurgie*, Podklady k předmětu KMM/MO.
- [8] KRÍŽ, Antonín, *Korozivzdorné oceli*, Podklady k předmětu KMM/SMA
- [9] STRNAD, Tomáš, *Obrobitelnost austenitické ocele*, Podklad k předmětu KTO/EMO, Plzeň 2011
- [10] PŘIKRYL, Z., MUSÍLKOVÁ, R.: *Teorie obrábění*. Učebnice vydaná v SNTL Praha v letech 1975 - 1982.
- [11] ŽÍDEK, M. *Metalurgická tvařitelnost ocelí za tepla a za studena*. Praha, 1995
- [12] LLewellyn, M.E. et al. *Copper in steel*. Ironmaking and Steelmaking, 1995, č.1
- [13] Sandvik Coromat. Sandviken, Švédsko: Příručka obrábění: kniha pro praktiky. 1997. XIII – 39s.
- [14] GRYESIK, W. *Fundamental of Machining of Metallic Materials (in Polish)*. WNT, Warsaw, 1998.
- [15] GRZESIK, W. *Advanced Machining Processes of Metallic Materials – Theory, Modelling and Applicatios*. Elsevier, 2008, ISBN 978-0-08-044534-2
- [16] BRYCHTA, Josef, ČEP, Robert, SADÍLEK, Marek, PETŘKOVSKÁ, Lenka, NOVÁKOVÁ, Jana. *NOVÉ SMĚRY V PROGRESIVNÍM OBRÁBĚNÍ*. Učební text. Ostrava 2007. 251 str. ISBN 978-80-248-1505-3.

- [17] BOUŘIL, Petr, *Vliv kinematiky broušení na průběh úhlu hřbetu u monolitního šroubovitého vrtáku*, Bakalářská práce. Plzeň: 2011.
- [18] M.A. Fugelso, *A standard conical point drill grinding machina*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001.
- [19] CONDYLLIS, A. et al.: *Révue de Métallurgie-CIT*, Dec. 1976, s.787-799
- [20] *Geometrie šroubovitého vrtáku*, Podklady ze cvičení k předmětu KTO/STO.
- [21] KŘÍŽ, Antonín, *Nové trendy vývoje tenkých vrstev vytvořených PVD a CVD technologií v aplikaci na řezné nástroje*. Podklady k předmětu KMM/MO
- [22] VEPREK, S., ARGON, AS, ZHANG, RF.: *Phil. Mag. Lett.*, vol. 87, 2007, p. 955
- [23] Cemo Con, *Kunden Magazine fur Beschichtungstechnologie, Tools*, Nr. 17. September 2004
- [24] KŘÍŽ, Antonín, ČESÁNEK, Jiří, BENEŠ, Petr, VNOUČEK, Milan, NIKL, Tomáš, ROUD, Pavel, ŠPIRIT, Zbyněk, ŽELEZNÝ, Jakub. *Aplikace progresivních vrstev na řezné nástroje s důrazem na integritu obrobeneho povrchu a řezné hrany*. Zprávu z řešení SGS projektu – 2012-044
- [25] CSELLE TIBOR A KOL., “TripleCoatings3® –New Generation of PVD - Coatings for Cutting Tools“, Libertyville, 2008
- [26] Anish Paul, Shiv G. Kapoor, Richard E. DeVor, *Chisel edge and cutting lip shape optimization for improved twist drill point design*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 45, April 2005

## Internetové zdroje

- [I] MM Průmyslové spektrum. *EMO Hannover popáté – nástroje pro výrobu a úpravu otvorů*. Dostupné z <<http://www.mmspektum.cz>>.
- [II] MM Průmyslové spektrum. *Nová řada zdokonalených vrtáků*. Dostupné z <<http://www.mmspektum.cz>>.
- [III] MM Průmyslové spektrum. *Slinutý karbid nad zlato*. Dostupné z <<http://www.mmspektum.cz>>.
- [IV] EURO INOX, *Evropská organizace na podporu trhu s korozivzdornou ocelí*, Dostupné z <<http://www.euro-inox.org>>.
- [V] MM Průmyslové spektrum - Strojírenský měsíčník, *Moderní obrábění nerezových ocelí*. Dostupné z <[http:// http://www.mmspektum.com](http://http://www.mmspektum.com)>.

- [VI] MM Průmyslové spektrum - Strojírenský měsíčník, *Efektivní frézování nerezových ocelí*. Dostupné z < [http:// http://www.mmspektrum.com](http://www.mmspektrum.com)>.
- [VII] Technická příručka obrábění 2010 - Vrtání, Dostupné z <<http://www.coromant.sandvik.com>>.
- [VIII] Moderní metody konstruování řezných nástrojů pomocí systémů CAD/CAM/CAE, Dostupné z < <http://ust.fme.vutbr.cz>>.
- [IX] MM Průmyslové spektrum - Strojírenský měsíčník, *Software pro výrobu a broušení nástrojů*. Dostupné z < [http:// http://www.mmspektrum.com](http://www.mmspektrum.com)>.
- [X] Metal cutting technologies – Online příručka obrábění. Dostupné z <<http://www.tumlikovo.cz>>.
- [XI] FOERCH – Prodej dílenského náradí. Dostupné z <[http:// http://www.foerch.cz](http://www.foerch.cz)>.
- [XII] WINTER Service – Prodej a poradenství řezných nástrojů. Dostupné z <<http://www.winter-servis.cz>>.
- [XIII] Technologie, stroje a zařízení. Dostupné z < <http://techstroj.g6.cz>>.
- [XIV] StimZet Vsetín – Výroba nástrojů na otvory. Dostupné z < <http://www.stimzet.cz>>.
- [XV] Seco Tools – *Obrábění otvorů*. Online katalog Dostupné z <[http://www.secotools.com/CorpWeb/Downloads/seconews2\\_2011/MN/holemaking/LR\\_CZ\\_Holemaking.pdf](http://www.secotools.com/CorpWeb/Downloads/seconews2_2011/MN/holemaking/LR_CZ_Holemaking.pdf)>.
- [XVI] MM Průmyslové spektrum - Strojírenský měsíčník, *Javy při vrtání nehrdzavejúcich austenitických ocelí*. Dostupné z < [http:// http://www.mmspektrum.com](http://www.mmspektrum.com)>.
- [XVII] MM Průmyslové spektrum - Strojírenský měsíčník, *Mechanická úprava monolitních nástrojů před PVD povlaky*. Dostupné z <[http:// http://www.mmspektrum.com](http://www.mmspektrum.com)>.
- [XVIII] Zoller Austria – Měřicí a seřizovací přístroje. Dostupné z < <http://www.zoller.cz>>.
- [XIX] ScienceDirect – International Journal of Machine Tool and Manufacture. *New method for determination of the pose of the grinding wheel for thinnig drill points*. Dostupné z < <http://sciencedirect.com>>.

## **Seznam příloh**

### **Příloha č. 1**

*Vyhodnocení složek řezné síly a momentů pro druhý navržený a druhý referenční nástroj.*

### **Příloha č. 2**

*Vyhodnocení konečného opotřebení pro druhý navržený a druhý referenční nástroj.*

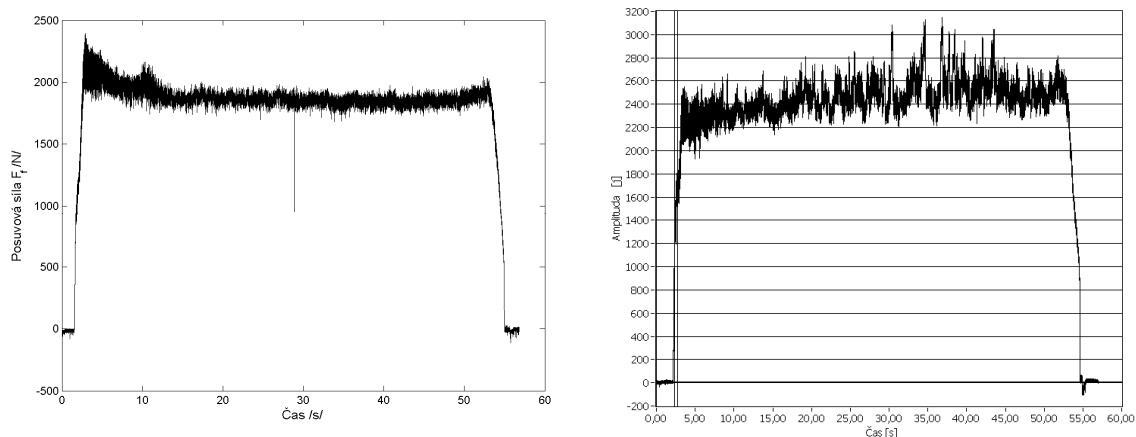
### **Příloha č. 3**

*Vyhodnocení jakosti vyvrtaných otvorů druhým navrženým a druhým referenčním nástrojem.*

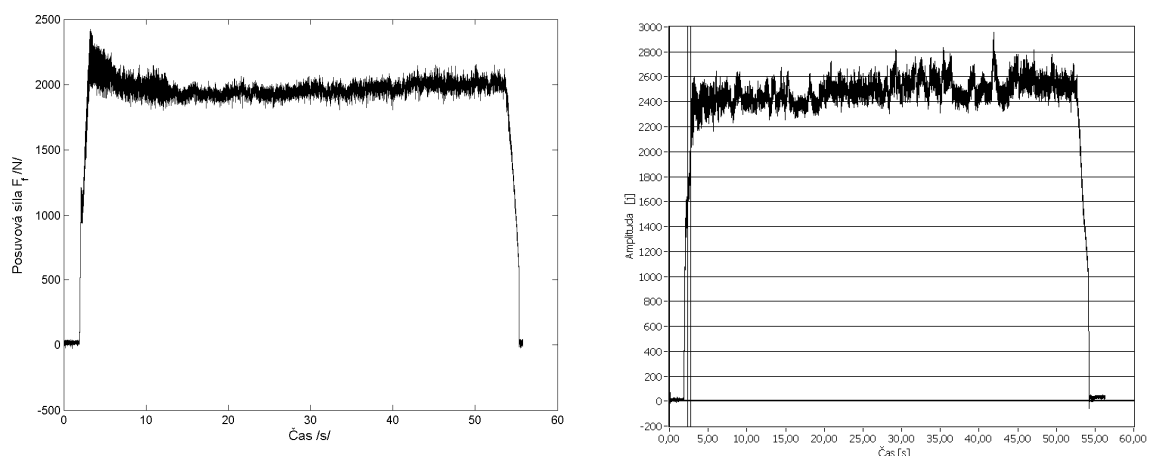


## Příloha č. 1

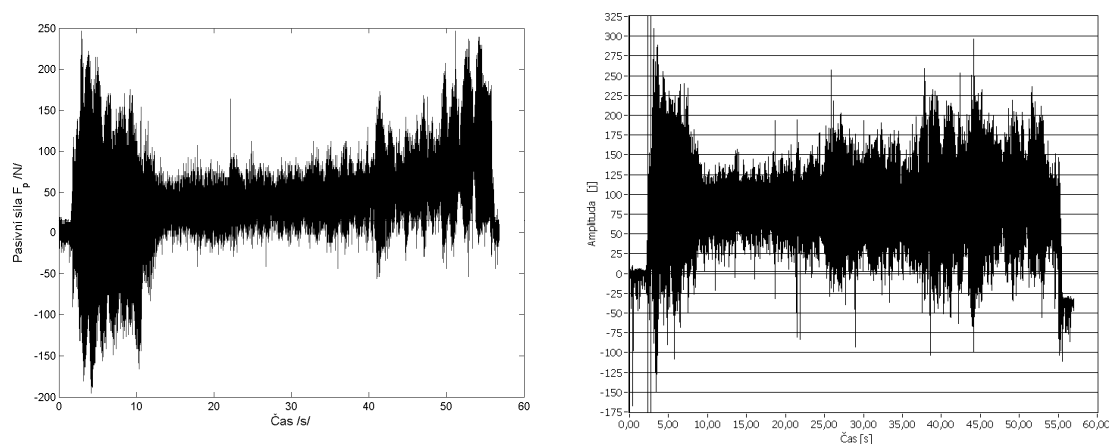
Vyhodnocení složek řezné síly a momentů pro druhý navržený a druhý referenční nástroj.



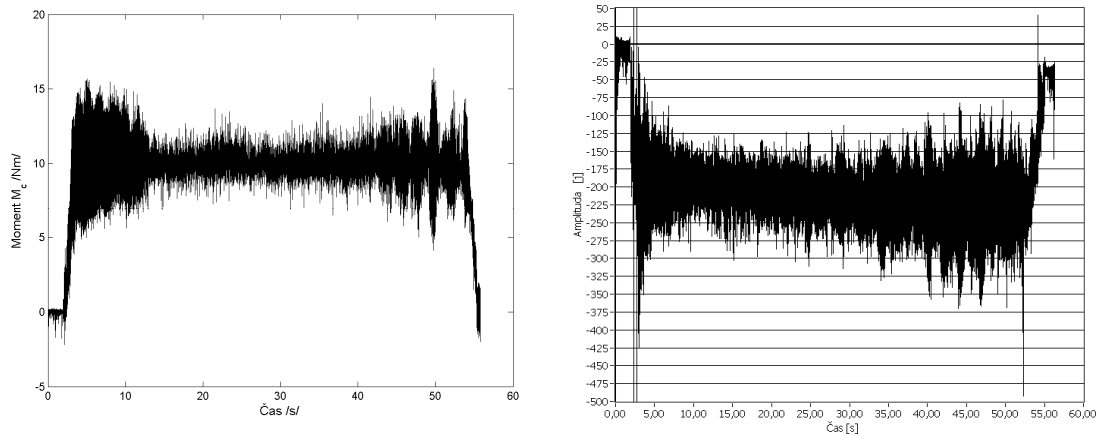
Obr. příloha č. 1 - 1 - Posuvová složka, otvor č. 1 – navržený nástroj (vlevo), referenční nástroj (vpravo)



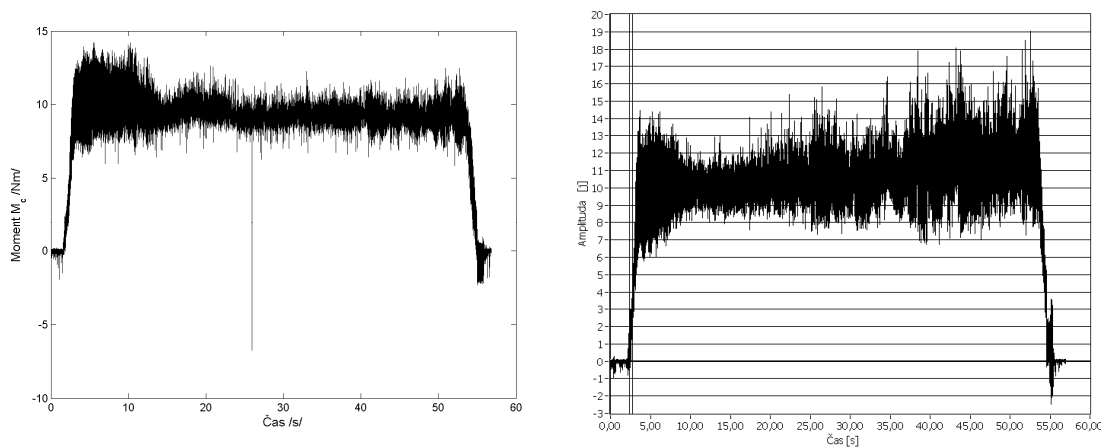
Obr. příloha č. 1 - 2 - Posuvová složka, otvor č. 24 – navržený nástroj (vlevo), referenční nástroj (vpravo)



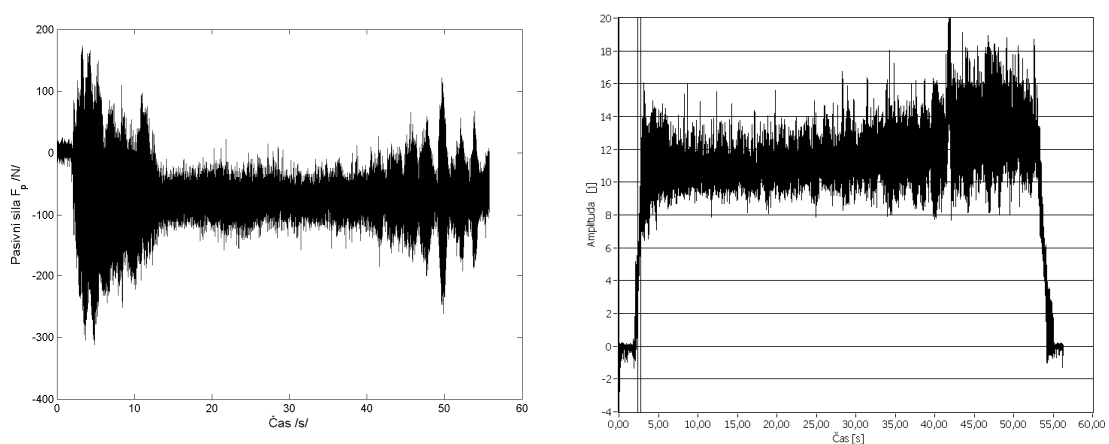
Obr. příloha č. 1 - 3 - Pasivní složka, otvor č. 1 – navržený nástroj (vlevo), referenční nástroj (vpravo)



Obr. příloha č. 1 - 4 - Pasivní složka, otvor č. 24 – navržený nástroj (vlevo), referenční nástroj (vpravo)



Obr. příloha č. 1 - 5 - Kroutící moment, otvor č. 1 – navržený nástroj (vlevo), referenční nástroj (vpravo)



Obr. příloha č. 1 - 6 - Kroutící moment, otvor č. 24 – navržený nástroj (vlevo), referenční nástroj (vpravo)

Výše jsou doplněny grafy z měření složek řezné síly a momentů u druhého navrženého a druhého referenčního nástroje. Pro připomenutí číselných hodnotu bude znovu uvedena tabulka s naměřenými hodnotami.

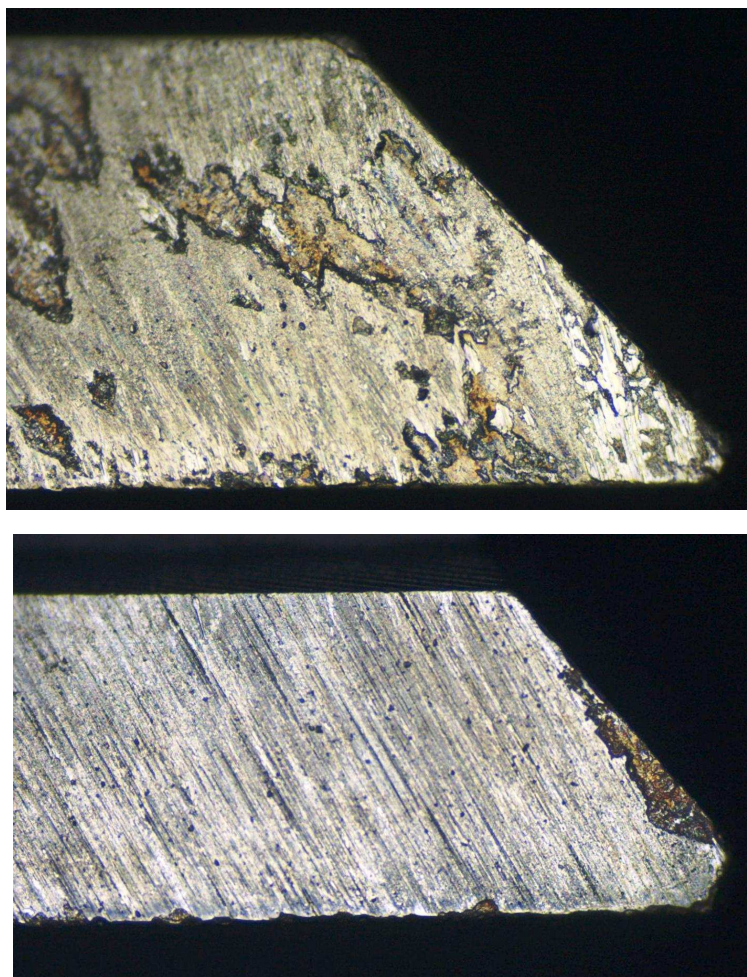
Testované nástroje	Sledované hodnoty	Otvor č.		
		1	24	66
1. Navržený nástroj	$F_f$ [N]	1950	2000	2100
	$F_p$ [N]	100	50	75
	$M_c$ [Nm]	12	11	11
2. Navržený nástroj	$F_f$ [N]	1850	2000	-
	$F_p$ [N]	60	80	-
	$M_c$ [Nm]	9	10	-
1. Referenční nástroj	$F_f$ [N]	2250	2300	-
	$F_p$ [N]	30	225	-
	$M_c$ [Nm]	11	12	-
2. Referenční nástroj	$F_f$ [N]	2400	2500	-
	$F_p$ [N]	100	225	-
	$M_c$ [Nm]	11	12	-

**Obr. příloha č. 1 - 7 - Naměřené hodnoty**

- Průběh posuvové a pasivní složky a dále i momentu u druhého navrženého nástroje opět viditelně stálější než u druhého referenčního.
- Po dvaceti čtyřech otvorech naměřeny menší hodnoty sil i momentů:  
 posuvová složka u 2. navrženého nástroje menší o 500 N  
 pasivní složka u 2. navrženého nástroje menší o 145 N  
 kroutící moment u 2. navrženého nástroje menší o 2 Nm

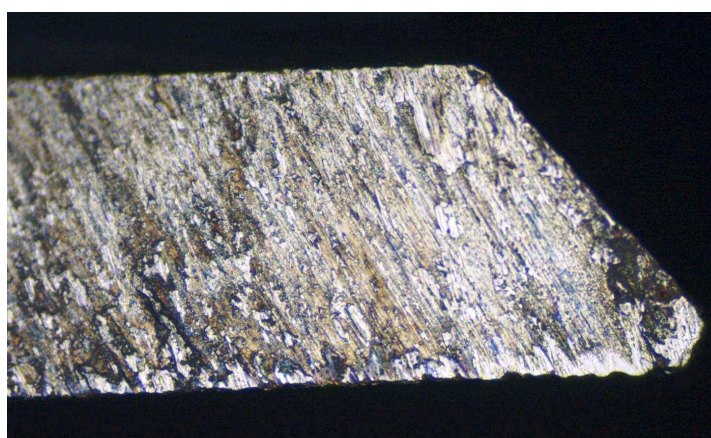
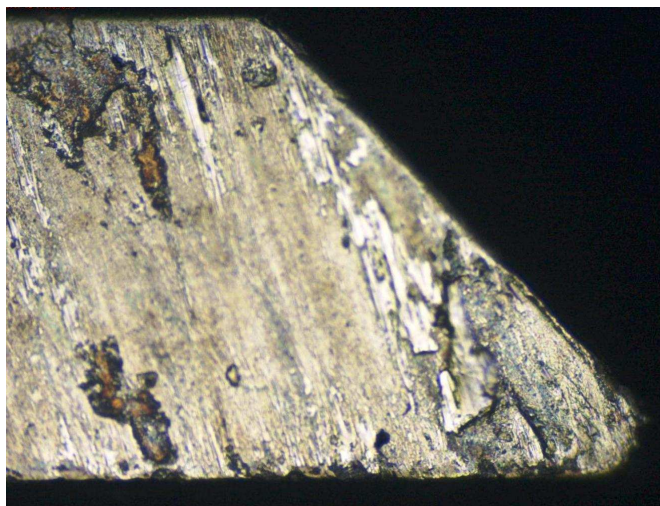
## Příloha č. 2

*Vyhodnocení konečného opotřebení pro druhý navržený a druhý referenční nástroj.*



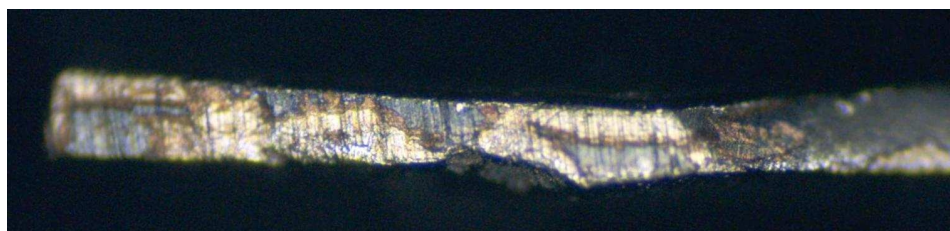
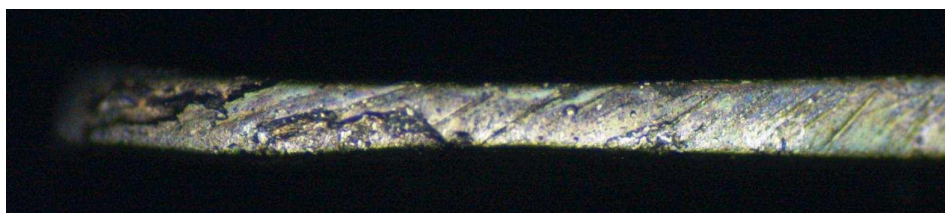
**Obr. příloha č. 2 - 1 - Stav obvodové fasety, pravá strana, otvor č. 24 – navržený nástroj (nahore), referenční nástroj (dole)**

U druhého referenčního nástroje jsou vidět vyštípnuté oblasti, kdežto u navrženého nástroje jsou nerovnosti na obvodu fasety tvořeny opět převážně stabilní váznuocí vrstvou. Dále je možné vidět rozsáhlé vyštípnutí hrany, která tvoří přechod z hlavního na vedlejší hřbet.



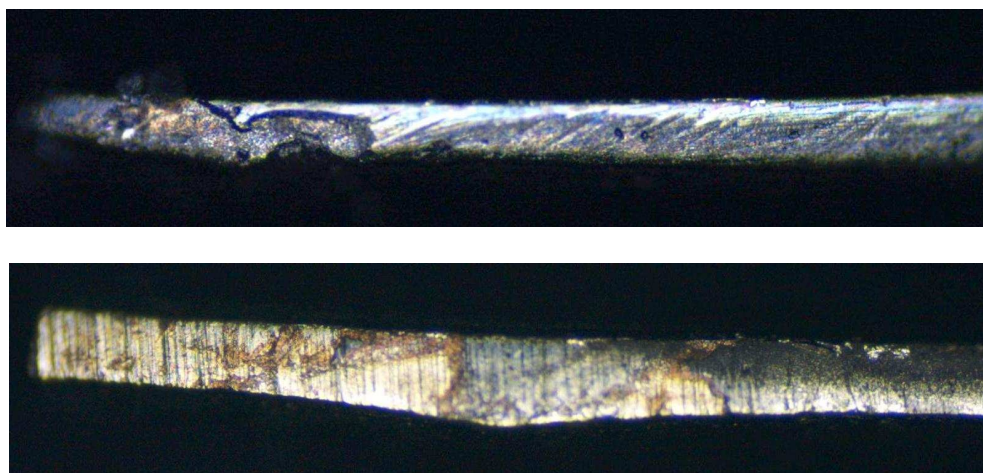
**Obr. příloha č. 2 - 2 - Stav obvodové fasety, levá strana, otvor č. 24 – navržený nástroj (nahore), referenční nástroj (dole)**

Také na levé straně obvodové fasety druhého referenčního nástroje je možno vidět velké vyštípnutí hrany na přechodu mezi hřbety a dále sérii menších lomů na obvodové fasetě blíže hlavnímu ostří. Na druhém navrženém nástroji není krom rozsáhlé stabilní váznuocí vrstvě k vidění žádné vážné poškození.



**Obr. příloha č. 2 - 3 - Stav ochranné fasety na hlavním ostří, pravá strana, otvor č. 24 – navržený nástroj (nahore), referenční nástroj (dole)**





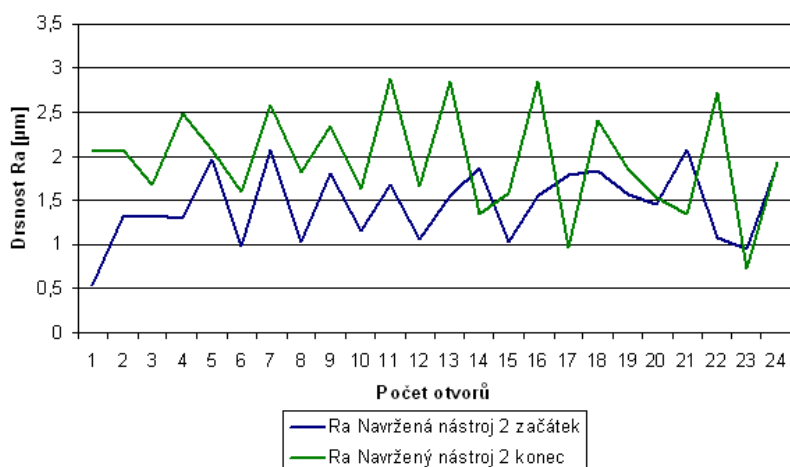
Obr. příloha č. 2 - 4 - Stav ochranné fasety na hlavním ostří, levá strana, otvor č. 24 – navržený nástroj (nahore), referenční nástroj (dole)

Na ochranné fasetě u hlavního ostří nelze jednoznačně říci, který ze zobrazených nástrojů utrpěl větší poškození, neboť jak referenční, tak navržený nástroj byl vyštípnut v místě, kde přechodu na tvarovém ostří. S tím rozdílem, že u referenčního nástroje je po dvaceti čtyřech otvorech vyštípnuta pravá strana a u navrženého nástroje levá strana hlavního ostří.

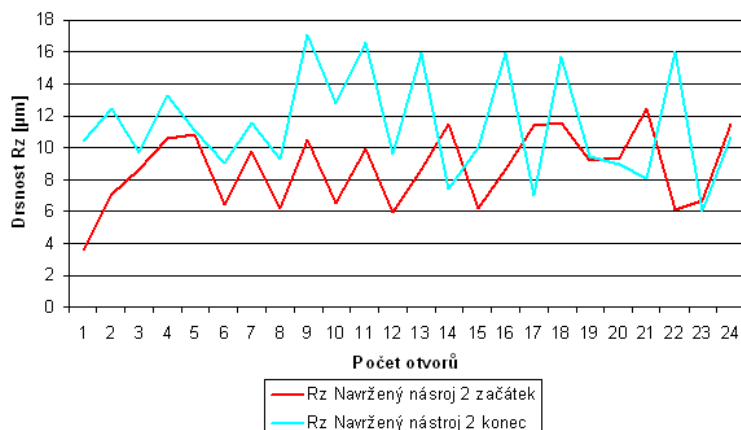
Dalo by se tedy dle rozsahu poškození u druhých testovaných nástrojů potvrdit, že si druhý navržený nástroj vede lépe. Předpokládá se, že se opět potvrdil vliv vyšší houževnatosti karbidu TSM 33, z kterého jsou navržené nástroje konstruovány.

### Příloha č. 3

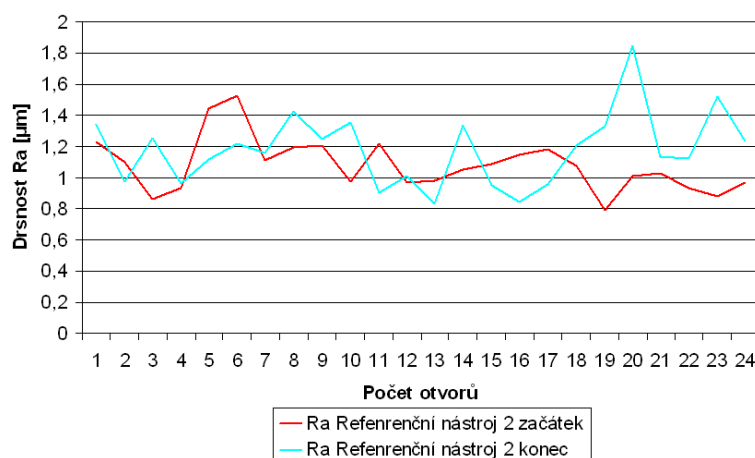
*Vyhodnocení jakosti vyvrtaných otvorů druhým navrženým a druhým referenčním nástrojem.*



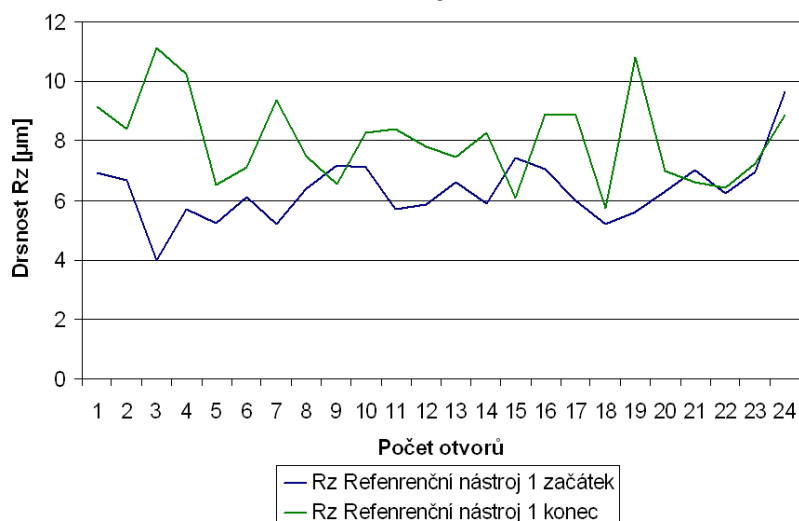
Obr. příloha č. 3 - 1 - Průběh střední aritmetické drsnosti Ra u druhého navrženého nástroje



Obr. příloha č. 3 - 2 - Průběh střední drsnosti Rz u druhého navrženého nástroje



Obr. příloha č. 3 - 3 - Průběh střední aritmetické drsnosti Ra u druhého referenčního nástroje



Obr. příloha č. 3 - 4 - Průběh střední drsnosti Rz u druhého referenčního nástroje

Hodnoty drsností u obou nástrojů jsou vyhovující stejně jakou u prvních testovaných nástrojů. Z uvedených grafů je ale patrné, že druhý referenční nástroj opět stabilně dosahuje lepších hodnot střední aritmetické i střední drsnosti.