

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Monolitní vrtáky pro obrábění nerezových ocelí

Solid drills for drilling stainless steels

Autor práce

Bc. Zbyněk Zelinka

V Praze

2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zelinka** Jméno: **Zbyněk** Osobní číslo: **459675**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Monolitní vrtáky pro obrábění nerezových ocelí

Název diplomové práce anglicky:

Solid drills for drilling stainless steels

Pokyny pro vypracování:

1. Porovnejte dostupné nástroje pro vrtání nerezových ocelí a těžkoobrobitelných materiálů.
2. Zhodnoťte u vybraných představitelů řeznou geometrii a tvar nástroje.
3. Navrhněte postup hodnocení nástrojů pro vrtání.
4. Proveďte vrtací a hodnotící zkoušky pro vybrané představitele.
5. Ověřte navrženou geometrii a způsob ostření vybraného představitele.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Lubomír Štajnochr, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce: _____



Ing. Lubomír Štajnochr
podpis vedoucí(ho) práce



Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



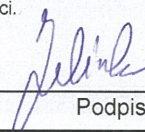
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

23.6.2020

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou prací na téma *Monolitní vrtáky pro obrábění nerezových ocelí* vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne:

Podpis autora:

Bc. Zbyněk Zelinka

Poděkování

Na tomto místě bych velice rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Lubomíru Štajnochrovi za jeho vstřícnost, odborné rady a za cenné připomínky, které mi při psaní diplomové práce poskytl. Poděkování patří i mé rodině a přítelkyni za jejich podporu v průběhu studia.

Abstrakt

Diplomová práce se věnuje monolitním vrtákům pro obrábění nerezových ocelí. V teoretické části jsou charakterizovány vrtací nástroje a uvedeny odlišnosti oproti ostatním obráběcím nástrojům. Dále je stanovena geometrie šroubovitého vrtáku a volba vhodné geometrie vrtáku pro různé obráběné materiály se zaměřením na způsob ostření. V další kapitole jsou uvedeny formy a metody hodnocení opotřebení nástrojů pro vrtání. Následují zvláštnosti a doporučení při obrábění austenitických a duplexních korozivzdorných ocelí. V praktické části byla zmapována současná nabídka výrobců šroubovitých vrtáků, které jsou určeny pro vrtání korozivzdorných ocelí. Vybrané nástroje byly mezi sebou porovnávány a hodnoceny z hlediska silového zatížení a jejich opotřebení. Měření silového zatížení bylo zaměřeno na vyhodnocení krouticího momentu a síly posuvu. Během testování opotřebení na hlavním hřbetu VB byla stanovena závislost rozvoje opotřebení nástroje na čase vrtání.

Klíčová slova

Vrtání, monolitní vrták ze slinutého karbidu, korozivzdorná ocel, řezné síly, opotřebení nástroje.

Abstract

This diploma's thesis is engaged in the solid carbide drills for drilling stainless steel. In the theoretical part of the thesis, the drilling tools are described and the differences from other machine tools are also described. Further the cutting geometry of a drill bit is defined. The selection of suitable geometry for various machining materials and methods of sharpening is defined too. In the next chapter, the forms and methods of tool wear evaluation are shown. Differences and recommendation during austenitic and duplex stainless steels machining are following. In the practical part, the current offer of manufacturers of twist drills, which are designed for drilling stainless steels, was identified. Selected tools were compared and evaluated in terms of cutting forces and tool wear. The measurement of the forces was focused on the evaluation of torque and thrust force. During tool wear test, the development of flank wear VB at drilling time was determined.

Key words

Drilling, solid carbide drill, stainless steel, cutting forces, tool wear.

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
A	[%]	Tažnost
A_D	[mm ²]	Celkový průřez odřezávané vrstvy
$A_{D'}$	[mm ²]	Průřez odřezávané vrstvy jedním břitem
a_p	[mm]	Hloubka řezu
b_D	[mm]	Šířka odřezávané vrstvy
$C_{F_c}, C_{F_f}, C_{M_c}$		Empirická konstanta
D	[mm]	Jmenovitý průměr vrtáku
d_1	[mm]	Jmenovitý průměr vrtáku
d_2	[mm]	Průměr stopky nástroje
f	[mm·min ⁻¹]	Posuv na otáčku
F_c	[N]	Řezná síla
F_f	[N]	Síla posuvu
F_{f0}	[N]	Počáteční střední hodnota síly posuvu
F_{f1}	[N]	Koncová střední hodnota síly posuvu
F_p	[N]	Pasivní síla
f_z	[mm]	Posuv na zub
h_D	[mm]	Tloušťka odřezávané vrstvy
k_c	[MPa]	Měrná řezná síla
KT	[mm]	Hloubka žlábků na čele
KV	[J]	Nárazová práce
l_1	[mm]	Celková délka vrtáku
l_2	[mm]	Délka drážky
l_3	[mm]	Doporučená hloubka otvoru
M_c	[N·m]	Krouticí moment
M_{c0}	[N·m]	Počáteční střední hodnota krouticího momentu
M_{c1}	[N·m]	Koncová střední hodnota krouticího momentu
n	[min ⁻¹]	Otáčky stroje
P_c	[kW]	Řezný výkon
P_f		Nástrojová boční rovina
P_{fe}		Pracovní boční rovina
P_n		Nástrojová normální rovina
P_o		Nástrojová ortogonální rovina
P_p		Nástrojová zadní rovina
P_r		Nástrojová základní rovina
P_s		Nástrojová rovina ostří
R_a	[μm]	Průměrná aritmetická úchylka profilu
R_m	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
$R_{p0,2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu
T	[min]	Trvanlivost nástroje
t	[min]	Čas obrábění
VB	[mm]	Šířka plochy opotřebení na hřbetu
VB_a, VB_b, VB_c	[mm]	Šířka plochy opotřebení na hřbetu v místech a, b, c
VB_{celk}	[mm]	Celková průměrná hodnota šířky plochy opotřebení na hřbetu
VB_L	[mm]	Limitní šířka plochy opotřebení na hřbetu

v_c	$[\text{m}\cdot\text{min}^{-1}]$	Řezná rychlost
v_e	$[\text{m}\cdot\text{min}^{-1}]$	Rychlost řezného pohybu
v_f	$[\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}]$	Rychlost posuvového pohybu
x	$[\text{mm}]$	Vzdálenost od osy vrtáku ke špičce
x_{F_c}, y_{F_c}		Empirická konstanta řezné síly
x_{F_f}, y_{F_f}		Empirická konstanta síly posuvu
x_{M_c}, y_{M_c}		Empirická konstanta krouticího momentu
Z		Počet břitů nástroje
Z	$[\text{min}]$	Životnost nástroje
Z_o		Počet možných přeostření břitu
$\alpha_o, \alpha_p, \alpha_f, \alpha_n$	$[\text{°}]$	Úhel hřbetu
α_{o1}	$[\text{°}]$	Úhel prvního hlavního hřbetu
α_{o2}	$[\text{°}]$	Úhel druhého hlavního hřbetu
$\beta_o, \beta_p, \beta_f, \beta_n$	$[\text{°}]$	Úhel břitu
$\gamma_o, \gamma_p, \gamma_f, \gamma_n$	$[\text{°}]$	Úhel čela
$\delta_o, \delta_p, \delta_f, \delta_n$	$[\text{°}]$	Úhel řezu
ε_r	$[\text{°}]$	Úhel špičky
η	$[\text{°}]$	Úhel řezného pohybu
κ'_r	$[\text{°}]$	Vedlejší úhel nastavení
κ_r	$[\text{°}]$	Úhel nastavení
λ_s	$[\text{°}]$	Úhel sklonu hlavního ostří
φ	$[\text{°}]$	Úhel posuvu

Seznam použitých zkratek

BTA	Boring and Trepanning Association (Asociace vyhrubování a vrtání na jádro)
CAD	Computer-aided design (Počítačem podporované projektování)
CAE	Computer-aided engineering
CAM	Computer-aided manufacturing (Počítačová podpora obrábění)
CNC	Computer Numerical Control (Počítačem číslicové řízení)
CVD	Chemical Vapor Deposition (Chemická depozice z plynné fáze)
ČSN	Česká technická norma
DC	Jmenovitý úhel vrtáku
DCON _{MS}	Průměr stopky
DIN	Deutsche Industrie–Norm (Německá národní norma)
FHA	Úhel stoupání šroubovitě drážky γ_f
HSS (RO)	Rychlořezná ocel
HV	Tvrдость podle Vickerse
ISO	International Organization for Standardization (Mezinárodní organizace pro normalizaci)
IT	Stupeň normalizované tolerance
KNB	Kubický nitrid boru
LCF	Délka drážky
LF	Funkční délka
LS	Délka stopky
LU	Doporučená hloubka otvoru (činná délka)
NO	Nástrojová ocel
OAL	Celková délka nástroje
P/M	Prášková metalurgie
PKD	Polykrystalický diamant
PKNB	Polykrystalický kubický nitrid boru
PL	Vzdálenost špičky
PVD	Physical Vapor Deposition (Fyzikální depozice z plynné fáze)
ŘK	Řezná keramika
SIG	Úhel hrotu $2\alpha_r$
SK	Slinutý karbid
STS	Single Tube System (Systém jedné trubky)

Obsah

Seznam použitých symbolů.....	5
Seznam použitých zkratek.....	7
Úvod.....	10
1 Technologie vrtání	11
1.1 Silové zatížení při vrtání.....	12
2 Charakteristika vrtacích nástrojů.....	15
2.1 Rozdělení nástrojů.....	15
2.1.1 Konstrukční prvky nástrojů.....	15
2.1.2 Druhy vrtacích nástrojů	16
2.2 Nástrojové materiály	18
2.2.1 Rychlořezné oceli	20
2.2.2 Slinuté karbidy	21
2.3 Geometrie šroubovitého vrtáku.....	23
2.3.1 Souřadnicové soustavy a jejich roviny	24
2.3.2 Nástrojové a pracovní úhly	25
2.3.3 Volba geometrie břitu šroubovitého vrtáku	26
2.4 Popis šroubovitého vrtáku	28
2.5 Ostření vrtáků.....	30
3 Opotřebení břitu nástroje pro vrtání.....	33
3.1 Formy opotřebení	34
3.2 Hodnocení opotřebení	35
4 Obrobitelnost	38
4.1 Obrobitelnost korozivzdorných ocelí	38
4.1.1 Feritické a martenzitické korozivzdorné oceli	39
4.1.2 Austenitické korozivzdorné oceli	39
4.1.3 Duplexní korozivzdorné oceli	40
5 Monolitní vrtáky pro korozivzdorné oceli	41
5.1 ISO 13399–1	41
5.2 Gühring s.r.o.	42
5.3 Hoffmann Group.....	44
5.4 Mitsubishi Materials.....	45
5.5 Sandvik Coromant.....	46

5.6	Ceratizit Group (WNT Tools).....	48
5.7	Walter AG.....	50
5.8	Dormer Pramet.....	51
5.9	Stimzet.....	52
5.10	Shrnutí a zhodnocení.....	53
5.10.1	Tvar a materiál nástroje.....	54
5.10.2	Vliv úhlu sklonu šroubové drážky γ_f	55
5.10.3	Vliv úhlu hrotu $2\alpha_r$	56
6	Vybrané metody hodnocení vrtáků.....	57
6.1	Měření silového zatížení v závislosti na opotřebení.....	57
6.2	Měření drsnosti vrtáků.....	59
6.3	Měření opotřebení dle vibrací, zvuku, akustické emise.....	59
7	Experiment.....	61
7.1	Popis použitého vybavení.....	61
7.1.1	Obráběný materiál.....	61
7.1.2	Obráběcí nástroje a řezné podmínky.....	63
7.1.3	Obráběcí stroje.....	65
7.1.4	Další zařízení.....	66
7.2	Testování silového zatížení vybraných nástrojů.....	67
7.2.1	Postup a vyhodnocení silového zatížení.....	67
7.3	Testování opotřebení bříty.....	72
7.3.1	Postup měření opotřebení bříty.....	74
7.3.2	Analýza naměřených dat – opotřebení bříty.....	75
7.3.3	Vyhodnocení opotřebení bříty.....	76
7.3.4	Postup měření výkonu, síly posuvu a analýza naměřených dat.....	84
7.4	Celkové zhodnocení testování.....	87
	Závěr.....	90
	Seznam použitých zdrojů.....	92
	Seznam použitých obrázků.....	97
	Seznam použitých tabulek.....	99
	Seznam příloh.....	100

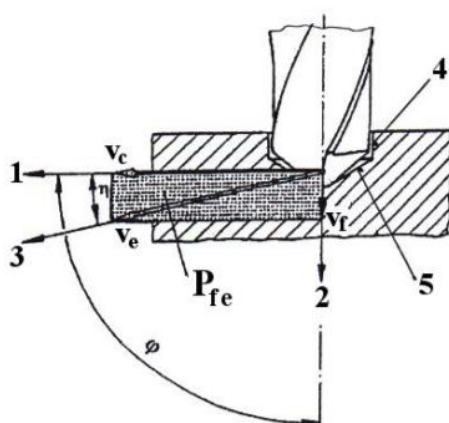
Úvod

Vrtání se řadí k nejdůležitějším metodám konvenčního obrábění. V porovnání s ostatními metodami obrábění zastupuje právě vrtání druhou příčku v četnosti provedených operací hned po soustružení. Proces vytváření otvorů je ovlivněn celou řadou faktorů, mezi které patří především tvar a geometrie břitu nástroje, nástrojový materiál a materiál obrobku. Výběr nástrojového materiálu má vliv na přesnost obrobku, opotřebení nástroje, drsnost obrobené plochy a další parametry, které souvisejí s procesem obrábění. Z toho důvodu probíhá vývoj se zaměřením na vylepšování vlastností již známých nástrojových materiálů, který vede ke zvýšení produktivity a ekonomiky obrábění. U monolitních nástrojů probíhá výzkum spíše v oblasti povlakových systémů, jenž výrazně vylepšují odolnost proti opotřebení ale i další užitečné vlastnosti.

Vylepšené vlastnosti nástrojových materiálů se uplatňují zejména při obrábění těžkoobrobitelných materiálů, mezi něž patří i některé skupiny korozivzdorných, resp. nerezových ocelí. Mezi těžkoobrobitelné korozivzdorné oceli patří austenitické a duplexní, jejichž charakteristické znaky budou v této práci popsány. Dále bude věnována pozornost nástrojům pro vrtání zmíněných těžkoobrobitelných ocelí, kdy budou popsány úpravy nástrojů a jejich geometrie. Jedním z cílů práce je zmapování současné nabídky výrobců nástrojů pro vrtání se zaměřením na monolitní (šroubovitě) vrtáky, které jsou určeny pro vrtání korozivzdorných ocelí. U vybraných nástrojů bude zhodnocena řezná geometrie a jejich tvar. Následně bude navržen postup hodnocení nástrojů pro vrtání, který se bude zabývat zejména opotřebením břitu. Metodika hodnocení nástrojů bude aplikována při vrtacích zkouškách vybraných šroubovitých vrtáků. Následně bude provedeno porovnání a vyhodnocení zkoumaných vrtáků na základě předem stanovených kritérií.

1 Technologie vrtání

Vrtání patří k základním způsobům obrábění a používá se pro zhotovování průchozích děr nebo neprůchozích otvorů. Díry a otvory se vytvářejí buď z plného, nebo předpracovaného materiálu. Vrtací nástroj vykonává obvykle hlavní rotační pohyb, kdy osa nástroje bývá zpravidla kolmá na plochu vrtaného polotovaru. Posuvný pohyb je přímočarý a probíhá ve směru osy vrtáku. Kinematika vrtání šroubovitého vrtáku je znázorněna na obrázku níže. [1]



- 1 – směr hlavního pohybu
- 2 – směr posuvného pohybu
- 3 – směr řezného pohybu
- 4 – obroběný povrch
- 5 – povrch řezu (přechodová plocha)
- v_c – řezná rychlost [$m \cdot \text{min}^{-1}$]
- v_f – rychlost posuvného pohybu [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]
- v_e – rychlost řezného pohybu [$m \cdot \text{min}^{-1}$]
- P_{fe} – pracovní boční rovina
- φ – úhel posuvu
- η – úhel řezného pohybu [2] [3]

Obrázek 1: Kinematika vrtání šroubovitým vrtákem [3]

Definice základních veličin týkající se vrtání [3]:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} [m \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1.1)$$

$$v_f = f \cdot n [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1.2)$$

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} = \frac{n}{1000} \cdot \sqrt{(\pi \cdot D)^2 + f^2} [m \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1.3)$$

$$f_z = \frac{f}{z} [\text{mm}] \quad (1.4)$$

D – jmenovitý průměr vrtáku [mm]

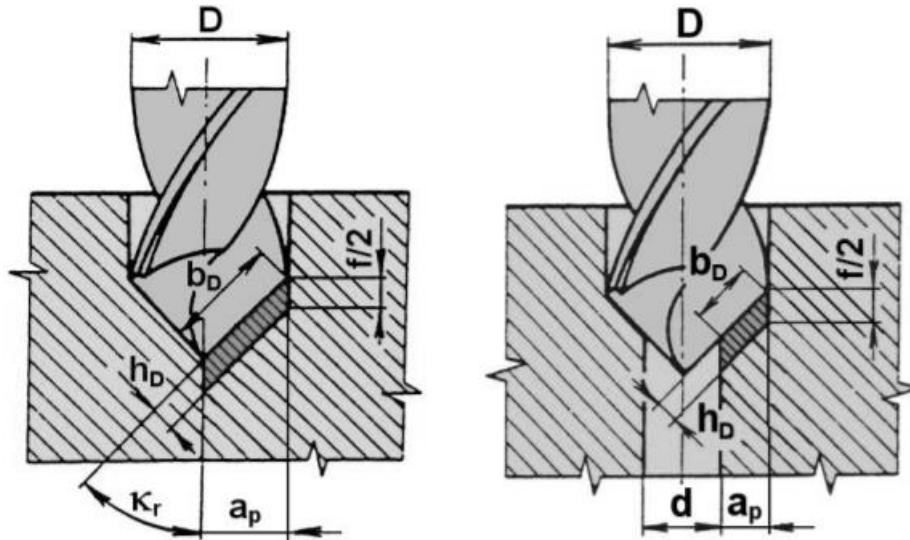
n – otáčky stroje [min^{-1}]

f – posuv na otáčku [$\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}$]

f_z – posuv na zub [mm]

z – počet břítů nástroje

Průřez odřezávané vrstvy je znázorněn na obrázku níže a následující vztahy jsou uvedeny pro odebrání třísky jedním břitem.



Obrázek 2: Průřez třísky při vrtání dvoubřítým šroubovým vrtákem [1]

$$A'_D = b_D \cdot h_D = a_p \cdot \frac{f}{2} \text{ [mm}^2\text{]}, \quad (1.5)$$

kde b_D je šířka odřezávané vrstvy,

h_D je tloušťka odřezávané vrstvy,

a_p je hloubka řezu (z plna: $a_p = \frac{D}{2}$, předvrtaná díra: $a_p = \frac{D-d}{2}$).

Celkový průřez odřezávané vrstvy pro dvoubřítý nástroj ($z=2$) při vrtání z plna:

$$A_D = z \cdot A'_D = \frac{D \cdot f}{2} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (1.6)$$

Tloušťka odřezávané vrstvy:

$$h_D = \frac{f}{2} \cdot \sin(\kappa_r) \text{ [mm]} \quad (1.7)$$

Šířka odřezávané vrstvy při vrtání z plna [1]:

$$b_D = \frac{D}{2 \cdot \sin(\kappa_r)} \text{ [mm]} \quad (1.8)$$

1.1 Silové zatížení při vrtání

Velikost složek řezných sil při vrtání šroubovým vrtákem jsou zejména závislé na vlastnostech obráběného materiálu, řezných podmínkách a geometrii nástroje. Hlavním parametrem ovlivňující řezné síly je obráběný materiál. Platí, že čím vyšší pevnost (tvrdost) obráběného materiálu, tím větší jsou řezné síly a kroučící moment.

Řeznými podmínkami jsou uvažovány parametry posuvu a řezné rychlosti. S rostoucím posuvem se zvětšuje krouticí moment a posuvové síly. Při zvyšování řezné rychlosti klesá velikost měrného řezného odporu, ale stoupá teplotní namáhání v místě řezu. [4]

Vliv geometrie vrtáků na řezné síly je dán především úhlem nastavení κ_r , kdy se zvětšujícím úhlem κ_r klesá pasivní složka síly. Tento jev vede k lepšímu vedení nástroje při vrtání a zlepšení válcovitosti vrtaných děr. Další vlivy geometrie nástroje na řezné síly jsou uvedeny v kapitole 2.3 Geometrie šroubovitého vrtáku.

Řezné síly při vrtání šroubovitým vrtákem se rozkládají do tří základních složek: tangenciální (řezná síla), radiální (pasivní síla) a axiální (síla posuvu). Dvoubřitým šroubovitým vrtákem je obráběný materiál odebrán současně oběma břity. [1]

Výsledné řezné síly jsou dány součtem příslušných složek na každém břitu, proto pro dvoubřítý vrták platí:

$$\text{Síla posuvu} \quad \bar{F}_f = \bar{F}_{f1} + \bar{F}_{f2} \quad [N] \quad (1.9)$$

$$\text{Pasivní síla} \quad \bar{F}_p = \bar{F}_{p1} + \bar{F}_{p2} \quad [N] \quad (1.10)$$

$$\text{Řezná síla} \quad \bar{F}_c = \bar{F}_{c1} + \bar{F}_{c2} \quad [N] \quad (1.11)$$

Při správném naostření vrtáku jsou velikosti složek řezných sil na obou břitech shodné (zanedbání vlivu upnutí, stroje aj.). Vrtání je obvykle definováno empirickými silovými vztahy:

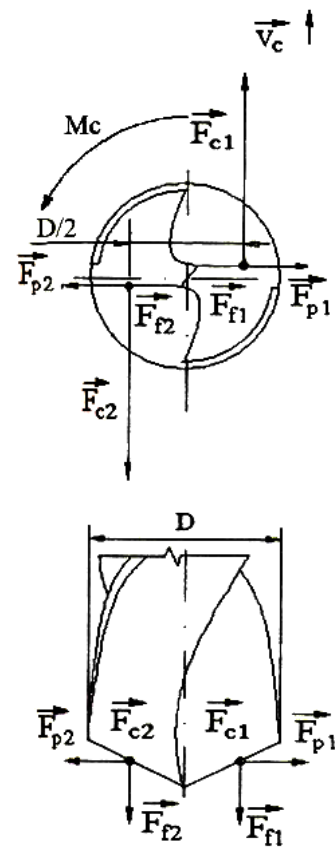
$$F_c = k_{F_c} \cdot D^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} \quad [N] \quad (1.12)$$

$$F_f = k_{F_f} \cdot D^{x_{F_f}} \cdot f^{y_{F_f}} \quad [N] \quad (1.13)$$

$$M_c = k_{M_c} \cdot D^{x_{M_c}} \cdot f^{y_{M_c}} \quad [N \cdot mm], \quad (1.14)$$

kde $C_{F_c}, C_{F_f}, C_{M_c}$ jsou empirické konstanty

a $x_{F_c}, x_{F_f}, x_{M_c}, y_{F_c}, y_{F_f}, y_{M_c}$ jsou empirické exponenty pro dané podmínky vrtání a obráběný materiál. Přibližné hodnoty jednotlivých empirických exponentů při vrtání oceli ($R_m = 750 \text{ MPa}$) jsou $x_{F_c} \cong 1$; $y_{F_c} \cong 0,75$; $x_{M_c} \cong 1,8$; $y_{M_c} \cong 0,78$. [5]



Obrázek 3: Rozklad sil při vrtání [4]

Pomocí měrného řezné odporu k_c a průřezu odřezávané vrstvy A_D , který je stanoven ve vzorci (1.6), lze určit tangenciální složku řezné síly F_c při vrtání šroubovitým vrtákem:

$$F_c = k_c \cdot A_D = (3 \div 6) \cdot R_m \cdot \frac{D}{2} \cdot f [N], \quad (1.15)$$

kde R_m je mez pevnosti v tahu [MPa], D je průměr vrtáku [mm], f je posuv na otáčku [$\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}$] a koeficienty $3 \div 6$ závisí na hrubosti práce (od hrubování po vrtání načisto). [5]

Silová dvojice složek F_c tvoří krouticí moment M_c :

$$M_c = F_c \cdot \frac{D}{2} [N \cdot \text{mm}] \quad (1.16)$$

2 Charakteristika vrtacích nástrojů

Na vrtací nástroje jsou kladeny specifické požadavky především z důvodu nekonstantní řezné rychlosti podél ostří, jenž je na obvodu nástroje maximální a směrem k ose nástroje klesá na nulovou hodnotu. Zároveň se mění i geometrie břitu nástroje podél ostří. Konstrukce vrtáků musí zohlednit omezený prostor pro odchod třísek vzhledem k rozměru drážky a při vrtání hlubokých otvorů zejména pro přívod procesní kapaliny. Náročnost vrtání je obvykle posuzována podle poměru délky ku průměru vrtaného otvoru.

2.1 Rozdělení nástrojů

2.1.1 Konstrukční prvky nástrojů

Mezi nejdůležitější konstrukčními prvky nástrojů patří břit, těleso nástroje a upínací stopka. Dále lze k těmto prvkům přidat i například řeznou drážku, dělič a utvářeč třísky, způsob přívodu procesní kapaliny a jiné. Existuje celá řada konstrukčních provedení břitu nástroje, které se dají rozdělit podle způsobu upevnění k řezné části nástroje nebo k tělesu nástroje. Jedná se o dělení břitů nástroje na:

- monolitní,
- pájené,
- lepené,
- mechanicky upevněné. [2]

Monolitní nástroje jsou celé (nebo řezná část) vyrobeny z jednoho druhu nástrojového materiálu. Typicky se tento způsob břitu používá pro nástroje z rychlořezné oceli a slinutého karbidu. Výroba nástrojů ze slinutého karbidu probíhá pomocí technologie slinování a následného obrobení brousicími kotouči s diamantovými zrny. Při broušení komplikovaného tvaru tělesa nástroje se spotřebuje značné množství nástrojového materiálu, proto se takto vyrábějí nástroje menších rozměrů nebo pro speciální použití (vrtáky, frézy, závitníky, výstružníky, protahovací trny apod.). [2]

Pájený břit nástroje se umísťuje buď do lůžka v řezné části, nebo do tělesa nástroje. Jako materiál pájeného břitu nástroje bývá obvykle slinutý karbid, polykrystalický diamant (PKD) nebo polykrystalický kubický nitrid boru (PKNB). Jedná se o jednoduchou technologii výroby, při které může vznikat napětí a následné trhliny při vnesení velkého množství tepla do břitu nástroje. Podobná technologie je lepení břitu nástroje, jenž se používá pro břity z rychlořezné oceli. Proces probíhá za nižší teploty

než pájení, a proto se zamezuje vzniku nežádoucího vnitřního napětí. Na druhou stranu spojení břitu s tělesem má menší pevnost v tahu a ve smyku. [2]

Mechanické upevňování břitů je velmi rozšířeno v nejrůznějších podobách, kdy jsou používány vyměnitelné řezné části, které jsou umístěny do lůžka v tělese nástroje. Většinou je břit nástroje tvořen vyměnitelnou břitovou destičkou, která se po opotřebení nepřeostřuje, ale destička se pootočí a opotřeбенý břit je nahrazen břitem novým. Nástrojovým materiálem je nejčastěji povlakovaný slinutý karbid, řezná keramika a pro speciální použití se jedná o břitové destičky z rychlořezné oceli nebo supertvrdých materiálů (PKD, PKNB). [2]

2.1.2 Druhy vrtacích nástrojů

Použití jednotlivých druhů vrtáků závisí především na přesnosti a rozměrech vrtané díry (otvoru). Dále jsou popsány základní druhy nástrojů pro technologii vrtání, jež lze rozdělit do následujících skupin podle jejich tvaru a použití:

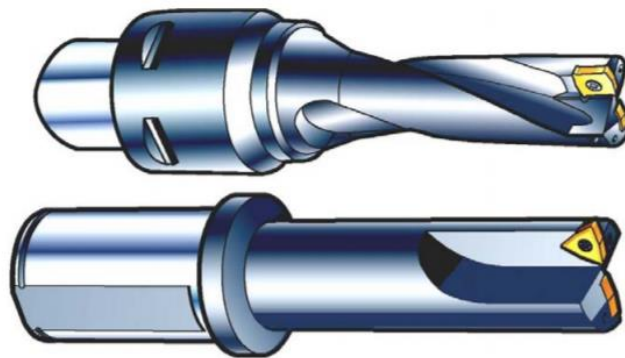
- šroubovitě vrtáky,
- středící vrtáky,
- kopinaté vrtáky,
- vrtáky s vyměnitelnou řeznou částí,
- dělové a hlavňové vrtáky,
- ejektorové vrtáky,
- BTA (Boring and Trepanning Association) nebo STS (Single Tube System) vrtáky,
- nástroje pro termální vrtání,
- odstupňované vrtáky,
- speciální sdružené nástroje. [1]

Nejčastěji používaný nástroj pro výrobu otvorů a děr je šroubovitý vrták. Jedná se obvykle o dvoubřitý obráběcí nástroj se šroubovitými drážkami k odvodu třísek a procesní kapaliny. Slouží pro vrtání válcových děr a otvorů, jejichž průměr bývá běžně do 20 mm a jejich hloubka vzhledem k průměru vrtáku D bývá do $30x D$ až $50x D$ při vrtání oceli o běžné pevnosti. Tříbřité nebo čtyřbřité šroubovitě vrtáky se používají pro vrtání s vyšší přesností a jednobřité obvykle pro hlubší díry (otvory), kdy jsou třísky snadněji odváděny z místa řezu. Šroubovitě vrtáky jsou běžně vybaveny chladicími

kanálky pro přívod procesní kapaliny, jenž je přiváděna na hlavní hřbet nástroje. Středící vrtáky jsou určeny pro vytváření středících a tvarových důlků (tzv. navrtávání). [6]

Kopinaté vrtáky umožňují vrtat díry o průměru od 10 do 120 mm dle nabídky daného výrobce. Dříve se používal i jako monolitní nástroj, nicméně v dnešní době se vyrábějí kopinaté vrtáky s vyměnitelnými břitovými destičkami z rychlořezné oceli nebo slinutého karbidu. Nástrojový úhel nastavení α_r je kolem 60° a drsnost vyvrtané díry bývá horší než po vrtání šroubovitým vrtákem.

Vrtáky s vyměnitelnou řeznou částí se nabízejí buď ve formě břitové destičky, nebo korunky (hlavice). Destičky i hlavice jsou vyráběny převážně z povlakovaných slinutých karbidů s přívodem procesní kapaliny uvnitř nástroje. Vrtáky s vyměnitelnými břitovými destičkami jsou velmi rozšířeny, protože mají velmi specifické vlastnosti. Destičky ze slinutých karbidů bývají vybaveny utvařeči třísky, které se podílejí na jejím dělení a odvodu z místa řezu. Vrtací nástroje bývají obvykle vybaveny dvěma břitovými destičkami, kdy jedna je umístěna u osy nástroje a druhá na obvodu. Vhodnými řeznými podmínkami, tvarem a polohou umístění obou destiček dochází k vyrovnání pasivní síly, což je důležité pro stabilitu řezání. Vrtáky s vyměnitelnými břitovými destičkami jsou značně omezeny hloubkou vrtání běžně do $3x D$ až $7x D$, nicméně některé nástroje mohou být použity i pro soustružení. [1]



Obrázek 4: Vrtací nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami od společnosti Sandvik Coromant [1]

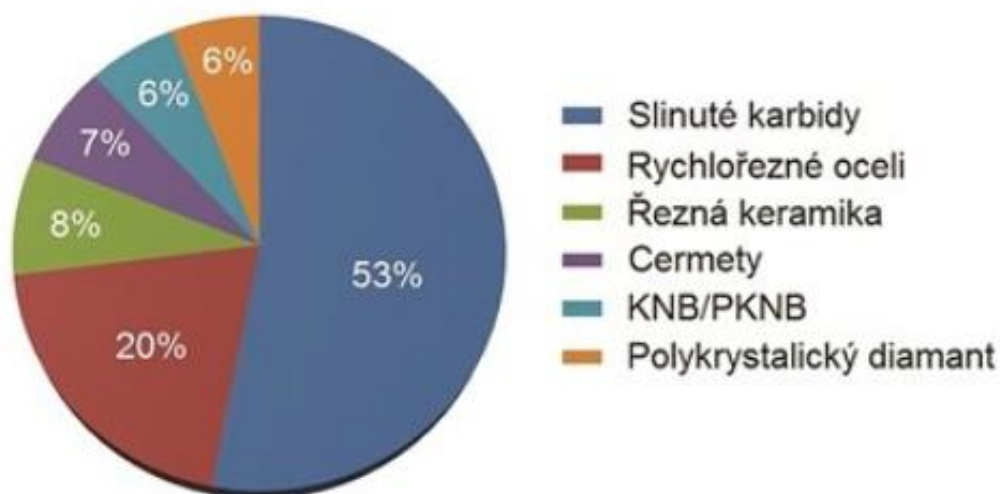
Dělové a hlavňové vrtáky slouží k vrtání hlubokých a přesných děr, kdy je řezná část nástroje s jedním břitem připájena na tyč nebo trubku o dané délce. Mohou být vybaveny vodítky k zachycení pasivní síly a tím usnadňují středění nástroje.

Ejektorové vrtáky jsou tvořeny vrtací hlavicí, jenž je umístěna do vnější vrtací trubky. Procesní kapalina je přiváděna mezikružím mezi vnější a vnitřní trubkou k břitům nástroje. Odvádění procesní kapaliny společně s třískami je provedeno vnitřní trubkou, kterou je kapalina nasávána. Jedná se o ejektorový efekt, který chrání obrobený povrch

zejména před kontaktem s třískami. Průměr vrtaných děr je 20 až 60 mm a jejich hloubka až $100x D$ při horizontálním vrtání nebo $50x D$ při vertikálním. U BTA a STS vrtáků je princip velice podobný jako u ejektorových vrtáků, jen je kapalina přiváděna mezerou mezi stěnou vrtaného otvoru a trubkou vrtáku. Hlavice jsou vyráběny až do průměru 180 mm při vrtání do plného materiálu. Při vrtání „na jádro“ může být průměr vrtaného otvoru od 120 do 300 mm. [1]

2.2 Nástrojové materiály

Sortiment materiálů pro řezné nástroje od nástrojových ocelí až po polykrystalický diamant je v dnešní době značně široký, kdy relativní podíly mezi spotřebou těchto materiálů se meziročně příliš neliší, ale každoročně stoupá jejich vyráběný objem o 4 až 6 %. Výraznější nárůst je u supertvrdých materiálů (PKD, KNB, PKNB), který je dán růstem aplikací při obrábění hliníkových a kompozitních materiálů a dalšího využití supertvrdých materiálů. [7]



Obrázek 5: Světová spotřeba nástrojových materiálů v současnosti [7]

Vývoj a výzkum nástrojových materiálů pro obrábění souvisí zejména s vývojem nových obráběcích strojů, které umožňují využít vyšší řezné rychlosti, posuvy, a tudíž i vyšší úběr obráběného materiálu. Tím jsou na nástroje a jejich materiály kladeny vysoké nároky na protichůdné vlastnosti, jako je zejména tvrdost a zároveň houževnatost. Hlavní požadavky na nástrojové materiály určené nejen pro obrábění těžkoobrobitelných ocelí jsou:

- vysoká tvrdost, pevnost a otěruvzdornost při pracovních teplotách,
- odvádění vysokého množství tepla,
- vysoká houževnatost (eliminace křehkého porušení břitu),
- odolnost proti opotřebení břitu,
- chemická stálost (odolnost vůči difuzi a oxidaci),
- odolnost proti teplotním rázům. [2] [8]

Řezivost nástroje je omezena pevnostními vlastnostmi a tento limit se projevuje zejména u monolitních nástrojů. Proto pro zvyšování řezivosti (trvanlivosti břitu) nástrojů se monolitní nástroje opatřují tvrdými povlaky, které poskytují vhodnou kombinaci tvrdosti na povrchu nástroje a houževnatosti podkladového materiálu. [2]

Pro monolitní nástroje se používají nástrojové materiály z rychlořezné oceli, slinutého karbidu nebo cermety, jenž se uplatňují také v povlakovaných formách. Existují dva způsoby povlakování nástrojů z plynné fáze. Povlaky se nejdříve nanášely technologií chemického povlakování (Chemical Vapor Deposition – CVD) a od 80. let 20. století se využívá i metoda fyzikálního povlakování (Physical Vapor Deposition – PVD). Obě technologie lze uplatnit při povlakování monolitních nástrojů. Hlavním omezením jsou pracovní teploty depozice tenkých vrstev. U metody PVD je pracovní teplota přibližně do 500 °C a u metody CVD až do 1000 °C. [2]

Tenké vrstvy zvyšují zejména odolnost břitu vůči abraznímu, adheznímu a chemickému opotřebení, což vede ke zvýšení odolnosti proti opotřebení. Dále povlaky snižují koeficient tření vůči obráběnému materiálu a zvyšují tvrdost břitu. Při obrábění povlakovanými nástroji se dají použít mnohonásobně větší řezné a posuvové rychlosti než u nepovlakovaných nástrojů při zachování jejich trvanlivosti. [2]

Monolitní nástroje se šroubovou drážkou (vrtáky, frézy apod.) se v dnešní době nejčastěji vyrábějí broušením tyčových polotovarů, které jsou produkty práškové metalurgie. Pro vrtání korozivzdorných ocelí monolitními nástroji je možno použít rychlořezné oceli, slinuté karbidy i cermety. Aplikace cermetů v podobě monolitního nástroje není příliš obvyklá a jeho užitečné vlastnosti jsou spíše alternativou slinutým karbidům. Dodáním broušených tyčových polotovarů pro výrobu osových nástrojů z cermetů se zabývá například společnost Ceratizit Group. Následují charakteristiky nejpoužívanějších nástrojových materiálů, kterými jsou rychlořezné oceli a slinuté karbidy.

2.2.1 Rychlořezné oceli

Rychlořezné oceli (HSS) patří do skupiny legovaných nástrojových materiálů, jenž se skládají z karbidotvorných prvků wolframu, molybdenu, vanadu, případně chromu a nekarbidotvorného kobaltu a dalších prvků (např. hořčík, křemík). Wolfram a vanad zvyšují odolnost proti opotřebení, molybden zvyšuje houževnatost a kobalt umožňuje zvýšení kalických teplot a zlepšuje teplotní odolnost. Podle obsahu legujících prvků jsou vhodné pro obrábění ocelí, ocelí na odlitky o vysoké pevnosti a těžkoobrobitelných materiálů. [8] [9]

Významné jsou především rychlořezné oceli vyrobené práškovou metalurgií, které mají oproti odlévané struktuře vyšší houževnatost, jelikož díky své houževnatosti mohou v některých případech nahradit nástroje ze slinutého karbidu. Použití povlaků na nástrojích z rychlořezné oceli nemá tak zásadní význam jako u slinutých karbidů. Povlakování probíhá metodou PVD, jejíž pracovní teplota nesmí být vyšší než teplota popouštění. Pro rychlořezné oceli jsou typické povlaky na bázi titanu (např. TiN, TiAlN, TiCN). [2] [9]

Následuje souhrn a popis typů rychlořezných ocelí pro výrobu nástrojů s obvyklým značením od výrobců:

- *HSS*: běžný nástrojový materiál pro obvyklé aplikace menšími nástroji, obrábění materiálů do meze pevnosti 900 MPa (např. 1.3343).
- *HSS-E*: vysoká otěruvzdornost a stabilita řezu, vhodný pro vystružování a nástroje větších průměrů (např. 1.3344).
- *HSS-Co*: dobrá teplotní odolnost při hrubování nebo nedostatečném chlazení, obrábění materiálů do meze pevnosti 1200 MPa (např. 1.3243).
- *P/M HSS-E*: homogenní struktura dosažená práškovou metalurgií, vysoká tvrdost a teplotní odolnost, obrábění vysokopevných a těžkoobrobitelných materiálů (např. 1.3207). [8] [9]

Výzkum a vývoj neprobíhá již tak intenzivně jako u ostatních nástrojových materiálů, jelikož aplikace rychlořezných ocelí je limitována zejména pracovní teplotou přibližně do 600 °C. Výrobci monolitních vrtáků se zaměřují na produkci nástrojů s obsahem kobaltu 5 až 10 hm. %, který zvyšuje pevnostní charakteristiky za tepla. Tyto oceli se nazývají jako vysokovýkonné a výrobci je zpravidla označují *HSS-Co*. Běžně jsou tyto nástroje doporučovány pro obrábění ocelí, korozivzdorných ocelí, litiny a neželezných kovů. Práškovou metalurgií je možné dosažení homogenní struktury

a vhodného chemického složení. Z toho důvodu jsou tyto monolitní nástroje určeny zejména pro těžkoobrobitelné materiály, jako jsou superslitiny a titan, žaruvzdorné slitiny, kalené oceli a litiny.

2.2.2 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy jsou nejběžněji používaným nástrojovým materiálem, jejichž světový podíl výroby představuje více než polovinu ze všech produkovaných nástrojových materiálů. Významnějším nástrojovým materiálem pro monolitní nástroje jsou slinuté karbidy, jelikož jsou pevnější, tvrdší, mají lepší teplotní odolnost než rychlořezné oceli. [9]

Výroba slinutých karbidů probíhá pomocí práškové metalurgie, kdy je připraven prášek karbidů a pojících kovů o daném poměru. Směs je lisována a po procesu slinování vznikne požadovaný výlisek. Základními karbidy obráběcích nástrojů je karbid wolframu WC, TiC, TaC a NbC. Ve většině případů se používá kobaltové pojivo, ve kterém se nachází jednotlivé karbidy. [2] [9]

Podle normy ČSN ISO 513 lze slinuté karbidy rozdělit do uvedených skupin s převažujícím složením:

- skupina K: WC + Co,
- skupina P: WC + TiC + Co,
- skupina M: WC + TiC + TaC/NbC + Co. [2]







Skupina K slouží pro obrábění materiálů s krátkou třískou (litiny, nezelezné slitiny a nekovové materiály). Tvrdá složka tvořená karbidem wolframu má za pokojové teploty podobnou tvrdost jako TiC, ale s rostoucí teplotou ztrácí tvrdost. Z toho důvodu je WC nevhodný pro materiály tvořící dlouhou třísku, která má velkou plochu styku s čelem nástroje, a proto více tepelně zatěžuje nástroj. Slinuté karbidy skupiny K mají dobrou tepelnou vodivost, což je využito u nástrojů k dostatečnému odvodu tepla z místa řezu. Tvorba krátké třísky umožňuje aplikaci tohoto druhu slinutého karbidu především u vrtáků, fréz, ale lze ho použít například i pro soustružení. [2] [10]

Skupinou P můžeme obrábět materiály s dlouhou třískou, jako jsou uhlíkové, slitinové a feritické korozivzdorné oceli. Karbid titanu zvyšuje odolnost proti difuzi za vysokých teplot, jenž může způsobovat vylamování břitů. Výhodou TiC je vysoká tvrdost při vyšších teplotách. Na druhou stranu karbid titanu zvyšuje křehkost a snižuje odolnost proti abrazi. [10]

Skupina M má široké uplatnění a je určena pro materiály se střední a dlouhou třískou, jako jsou oceli na odlitky, austenitické korozivzdorné oceli a tvárné litiny. Dále se používají pro těžké hrubovací a přerušované řezy. Skupiny P, M se uplatňují spíše při soustružení a frézování. [2] [10]

Slinuté karbidy s menšími čísly jsou vysoce odolné proti opotřebení, mají vysokou houževnatost a jsou velmi tvrdé, což je způsobeno vysokým obsahem WC a malým obsahem Co. Slinuté karbidy s označení K01 až K10 jsou určené pro obrábění načisto a označení K30 až K40 se používá pro hrubování. V tabulce níže je znázorněn vliv chemického složení slinutých karbidů na výsledné vlastnosti nástrojů. Popsané závislosti se dají aplikovat i pro ostatní skupiny slinutých karbidů. [5]

Tabulka 1: Vlastnosti slinutých karbidů [2] [5]

Slinutý karbid	Obsah WC	Obsah Co	Odolnost proti opotřebení	Houževnatost	Tvrдость	Hrubost práce
K01						
K10						
K20						
K40						

Vlastnosti slinutých karbidů lze ovlivňovat typem a velikostí částic, množstvím pojiva a procesem výroby. Při porovnání s rychlořeznými oceli mají slinuté karbidy větší tvrdost, otěruvzdornost a tuhost, ale jsou méně houževnaté. U monolitních vrtáků a fréz je jádro nástroje tvořeno slinutým karbidem o větší tuhosti a zbývající část je z jiného druhu slinutého karbidu, která je více odolná vůči opotřebení. Povlakování slinutých karbidů má větší význam oproti povlakování rychlořezných ocelí, jelikož povlaky na slinutých karbidech výrazněji vylepšují požadované vlastnosti než stejné povlaky na rychlořezných ocelích. [2] [9]

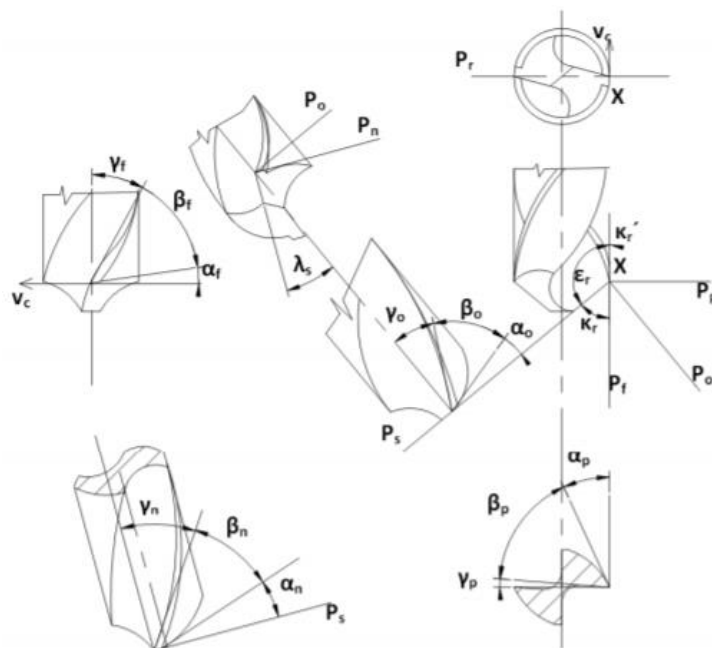
Při procesu povlakování slinutých karbidů se uplatňují obě metody z plynné fáze CVD i PVD. Metodou CVD se vytvářejí většinou vícevrstvé povlakové systémy v nejrůznějších kombinacích, ve kterých se používají kombinace povlaků na bázi TiC, TiN, TiCN, Al₂O₃ a dalších. Slinuté karbidy se dají povlakovat i vrstvami diamantu a kubického nitridu boru, které se používají ke zlepšení odolnosti proti opotřebení u nástrojů pro mikroobrábění. Technologie výroby a vývoje tenkých vrstev pro těžkoobrobitelné materiály se dále zabývá povlaky gradientními (např. TiAlN,

AlTiN, AlCrN), nanokompozitními (např. TiAlSiN, CrAlSiN, AlCrBN, AlCrN/SiN), supermřížkovými i tzv. „inteligentními“, jenž by mohly v budoucnu autonomně vyhodnocovat opotřebení nástroje. [8] [11]

Pro monolitní nástroje je významnější metoda PVD, kdy lze kombinovat jejich principy nanášení. Kombinace principu obloukového napařování a magnetronového napařování se používá při výrobě povlaku AlCrBN, který se vyznačuje vysokou tvrdostí, nízkým vnitřním napětím a vysokou tepelnou stabilitou. [12] Při přípravě uvedených povlaků je velmi důležité snížit obsah nečistot, kdy například u nanokompozitních povlaků se významně zvyšuje tvrdost a houževnatost při snížení obsahu kyslíkových nečistot. [13]

2.3 Geometrie šroubovitého vrtáku

Geometrie nástroje má významný vliv na řezné síly, odvod tepla z místa jeho vzniku, amplitudu samobuzeného kmitání, pevnost nástroje, tvorbu a odvod třísek. Mezinárodní norma ČSN ISO 3002–1 stanovuje názvosloví pro základní pojmy, jenž se týkají obráběcích nástrojů, a je dále platná pro geometrii různých druhů obráběcích nástrojů. Norma se zaměřuje na nástroje s jednou řeznou hranou, šroubovitě vrtáky, frézy a ruční náradí. [14] Následuje souhrn nejzásadnějších parametrů, které se vztahují ke geometrii šroubovitého vrtáku.



Obrázek 6: Geometrie šroubovitého vrtáku [4]

2.3.1 Souřadnicové soustavy a jejich roviny

Geometrie nástrojů se stanovuje v nástrojové a pracovní souřadnicové soustavě. Konstrukce, výroba a kontrola nástroje je prováděna v nástrojové souřadnicové soustavě (statická). Tato soustava vychází z předpokládaného směru hlavního pohybu a z předpokládaného směru posuvu. Pracovní souřadnicová soustava (kinematická) slouží k zavedení geometrie nástroje během řezného procesu. Souřadnicové soustavy se umisťují do vybraného bodu ostří, ve kterém chceme určit geometrii (tzv. uvažovaný bod ostří). Úhly vztahující se k jednotlivým rovinám mají shodné indexy s indexem příslušné roviny. [2]

Nástrojová souřadnicová soustava je zavedena následovně:

- **Nástrojová základní rovina P_r** je kolmá na vektor rychlosti předpokládaného hlavního pohybu a prochází uvažovaným bodem ostří.
- **Nástrojová boční rovina P_f** se nachází v předpokládaném směru vektoru rychlosti posuvu a hlavního pohybu.
- **Nástrojová zadní rovina P_p** je kolmá na nástrojovou základní rovinu P_r a na nástrojovou boční rovinu P_f .
- **Nástrojová rovina ostří P_s** je tečná k ostří a kolmá na nástrojovou základní rovinu P_r .
- **Nástrojová ortogonální rovina P_o** je kolmá na nástrojovou základní rovinu P_r a zároveň je kolmá na nástrojovou rovinu ostří P_s .
- **Nástrojová normální rovina P_n** je kolmá k ostří. [2] [14]

Pracovní souřadnicová soustava (kinematická) je určena analogicky jako nástrojová souřadnicová soustava. Označování se odlišuje indexem e. Pracovní souřadnicová soustava se liší tím, že vychází ze směru výsledného řezného pohybu v_e . Pracovní základní rovina P_{re} a nástrojová základní rovina P_r svírají úhel η , který tvoří rozdíl mezi oběma soustavami. Úhel η svírá směr vektoru rychlosti hlavního pohybu v_c a směr vektoru rychlosti výsledného řezného pohybu v_e . Při vrtání je úhel řezného pohybu η ovlivňován zejména velikostí posuvného pohybu v_f , kdy s rostoucí hodnotou v_f se rovněž zvětšuje úhel η .

2.3.2 Nástrojové a pracovní úhly

Nástrojové a pracovní úhly jsou definovány v příslušných souřadnicových soustavách, kdy se k symbolu pro jednotlivý úhel přidá index roviny, ve které je úhel měřen. Ve většině případů je rozdíl mezi nástrojovou a pracovní souřadnicovou soustavou zanedbatelný a lze pracovat pouze se statickou soustavou.

Nástrojové úhly jsou popsány následovně:

- **Úhel nastavení κ_r** je měřen mezi rovinou hlavního ostří P_s a boční rovinou P_f v základní rovině P_r .
- **Vedlejší úhel nastavení κ'_r** je měřen mezi rovinou vedlejšího ostří P'_s a boční rovinou P_f v základní rovině P_r .
- **Úhel špičky ε_r** je měřen mezi rovinou hlavního ostří P_s a rovinou vedlejšího ostří P'_s v základní rovině P_r .
- **Úhel hřbetu α_o** ($\alpha_p, \alpha_f, \alpha_n$) je svírán mezi rovinou ostří P_s a plochou hřbetu, který je měřen v rovině P_o (P_p, P_f, P_n).
- **Úhel břitu β_o** ($\beta_p, \beta_f, \beta_n$) je určen mezi plochou čela a plochou hřbetu v rovině P_o (P_p, P_f, P_n).
- **Úhel čela γ_o** ($\gamma_p, \gamma_f, \gamma_n$) je měřen mezi čelem a základní rovinou P_r v rovině P_o (P_p, P_f, P_n).
- **Úhel řezu δ_o** ($\delta_p, \delta_f, \delta_n$) je mezi čelem a rovinou ostří P_s v rovinách P_o (P_p, P_f, P_n).
- **Úhel sklonu hlavního ostří λ_s** se nachází mezi ostřím a rovinou základní P_r v rovině ostří P_s . [2]

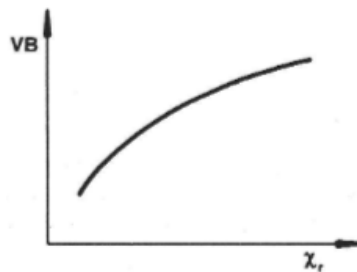
U vrtáků a fréz prochází základní rovina P_r osou nástroje. Nástroje, které mají posuv ve směru vlastní osy (např. vrták, závitník), je boční rovina P_f rovnoběžná s osou. Z toho lze vyvodit, že úhel stoupání šroubové drážky je vidět v rovině boční P_f a jedná se o úhel čela γ_f . Úhel hlavního sklonu ostří λ_s je u šroubového vrtáku vždy záporný a jeho velikost závisí převážně na tloušťce jádra vrtáku. [2]

Úhel špičky $\varepsilon_r = 120^\circ$ u dvoubřitého vrtáku odpovídá také úhlu mezi oběma břity v základní nástrojové rovině P_r . Když hodnota vedlejšího úhlu nastavení κ'_r se blíží nule, tak v tomto případě platí, že $\varepsilon_r = 2 \cdot \kappa_r$. Při změně úhlu špičky již tato rovnost neplatí, jelikož při zvětšení úhlu špičky se zmenšuje úhel nastavení κ_r a naopak. Z toho důvodu je značení sjednoceno pojmem úhel hrotu $2\kappa_r$, jenž je přesně zobrazen na obrázku v podkapitole 2.4 Popis šroubovitého vrtáku.

2.3.3 Volba geometrie břitu šroubovitého vrtáku

Stanovení vhodné kombinace nástrojového materiálu a jeho geometrie umožňuje maximální využití vlastností rezného nástroje. Pro volbu geometrie břitu šroubovitého vrtáku platí stejné zásady jako pro jakýkoli jiný obráběcí nástroj, a proto obecná doporučení a vlivy jednotlivých nástrojových úhlů na změnu složek rezných sil, amplitudu samobuzeného kmitání, teploty řezání, opotřebení břitu a chování oblasti primární plastické deformace jsou popsány pouze stručně. Jednotlivé vlivy geometrie nástroje lze detailně nalézt například v Teorii obrábění [5]. Pro jednotlivé nástrojové úhly se uplatňují stejné mechanismy bez ohledu na to, v jakých rovinách se geometrické parametry nacházejí. Následují základní zásady pro volbu geometrických parametrů, které jsou typické pro šroubovitě vrtáky.

Úhel hrotu vrtáku $2\kappa_r$ a úhel stoupání šroubové drážky, který odpovídá úhlu čela v boční rovině γ_f , se určují zejména podle druhu obráběného materiálu. Volba úhlu nastavení κ_r závisí obecně na tuhosti technologické soustavy. Během zmenšení úhlu nastavení κ_r se zároveň zmenšuje intenzita opotřebení nástroje, ale zvětšuje se rezná síla F_c , pasivní síla F_p a nástroj je náchylnější ke vzniku samobuzeného kmitání. [5] V tabulce níže je znázorněn vliv úhlu κ_r na vnikání vrtáku do materiálu o různé tvrdosti.



Obrázek 7: Závislost šířky opotřebené plochy hřbetu VB na úhlu nastavení κ_r [15]

Hodnoty úhlu γ_f jsou při vrtání oceli o běžné pevnosti $25^\circ \pm 5^\circ$. Při vrtání houževnatějších materiálů (např. měkké cementační oceli, slitiny s Si, mosaz apod.) bývá úhel stoupání drážky vyšší ($\gamma_f = 42^\circ \pm 5^\circ$). Tento úhel ovlivňuje i teplotní zatížení nástroje, kdy při malém úhlu stoupání drážky dochází k rychlému odvádění třísek z místa řezu, a tím se snižuje teplotní zatížení nástroje. Proto je menší úhel γ_f doporučován pro těžkoobrobitelné materiály, jehož hodnota je obvykle limitována $\gamma_f = 12$ až 15° . Při velkém úhlu γ_f může dojít k přílišnému pýchování třísky v drážce vrtáku, v důsledku čehož mohou být drážky leštěny. Úhel stoupání drážky nemá vliv jen na odvod třísek, ale také na celkovou tuhost, pevnost a trvanlivost nástroje. [6] [9] [16]

Tabulka 2: Základní geometrie šroubových vrtáků podle materiálu obrobku [16]

Vrtaný materiál	Ocel, litina	Hliník	Měď	Mosaz	Elektron (slitina Mg a Al)	Tvrdá pryž	Mramor, lisované hmoty	Ocel. plechy, LLG
Úhel hrotu $2\kappa_r$ [°]	118	130 až 140	125	130	100 až 116	30	80	180
Úhel šr. drážky γ_f [°]	25	35 až 45	35 až 45	10	45	10	10	10

Úhel čela γ_o je závislý na úhlu sklonu šroubovice a vzdálenosti uvažovaného bodu ostří od osy vrtáku. Největší hodnotu úhlu čela γ_o je dosažena na špičce vrtáku. Směrem k ose nástroje se hodnota úhlu čela γ_o zmenšuje a v oblasti příčného ostří jsou hodnoty záporné. V tabulce výše je znázorněno, že při vrtání tvrdých a vysokopevných materiálů se volí malý úhel čela γ_o , proto je i úhel sklonu šroubové drážky γ_f menší. [16]

Úhel hřbetu α_o má na obvodě nástroje nejmenší hodnotu (6 až 18°) a směrem k ose vrtáku se zvětšuje. Procentuální podíl mezi hodnotami úhlu hřbetu α_o na obvodě a v okolí osy vrtáku může být až 25 %. Obecně platí, že úhel α_o se volí podle toho, aby byla práce tření na hřbetu nástroje co nejmenší. Zmenšení práce tření na hřbetu se docílí zvětšením úhlu hřbetu α_o . Na druhou stranu velký úhel α_o snižuje pevnost bříty, a proto není doporučován zejména při obrábění tvrdých a vysokopevných materiálů. Podbroušení α_o se provádí v závislosti na druhu vrtaného materiálu. Pro velmi tvrdé obráběné materiály se doporučuje $\alpha_o = 6$ až 9°. S klesající tvrdostí materiálu roste doporučovaná hodnota úhlu hřbetu, takže pro středně tvrdé materiály je $\alpha_o = 9$ až 12° a pro měkké $\alpha_o = 12$ až 18°. [16]

Vlivy úhlů čela, hřbetu a bříty lze souhrnně popsat úhlem řezu δ_o , který má největší vliv na oblast primární plastické deformace ze všech geometrických charakteristik. Při zvětšení úhlu řezu δ_o se oblast primární plastické deformace natáčí směrem do obrobku a rozšiřuje se, tím roste součinitel pěchování a měrný řezný odpor. Změna oblasti primární plastické deformace s úhlem řezu δ_o je dána změnou řezných sil, kdy všechny složky sil rostou se zvětšujícím úhlem řezu δ_o a natáčí se směrem do obrobku. Během zmenšení úhlu řezu δ_n výrazně klesá amplituda samobuzeného kmitání, ale zároveň klesá i mechanická pevnost bříty. Poloměr ostří ρ má podobný vliv jako úhel řezu, jelikož při zvětšování poloměru ostří roste také střední hodnota úhlu řezu a naopak. [5] [15] [16]

2.4 Popis šroubovitého vrtáku

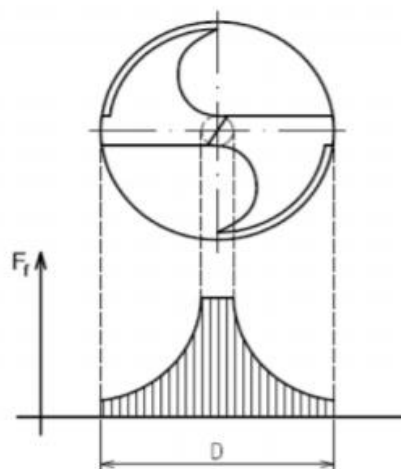
Šroubovitý vrták se skládá ze stopky a tělesa nástroje, jenž se dále dělí na základní prvky – břit, žebro, jádro, drážka. Popis šroubovitého vrtáku s geometrickými definicemi je popsán v normě ČSN ISO 5419. Hlavní konstrukční prvky a geometrie dvoubřitého šroubovitého vrtáku s kuželovou a válcovou stopkou jsou uvedeny na obrázku na konci podkapitoly. Vrtání šroubovitým vrtákem se obvykle dosahuje základní tolerance IT 11 až 13 a drsnosti obrobeného povrchu R_a 3,2 až 12,5. [17] [18]

Tuhost upínacího systému je ovlivněna délkou a přesností průměru stopky. Válcová stopka se upíná do kleštinových, speciálních hydraulických nebo mechanických upínačů. Kuželová stopka se může upnout přímo do vřeten stroje s možným použitím redukčních pouzder. [2] [6]

Konstrukční vrtacích nástrojů se při návrhu drážky musí vypořádat se dvěma protichůdnými parametry, kterými jsou efektivní odvod třísek z místa řezu směrem ke stopce a vysoká tuhost nástroje. Při zvětšování počtu drážek se zvyšuje teplota v místě řezu, proto se volí nejmenší možný počet drážek. Vhodný je záběr dvou břitů nástroje současně, protože dojde ke snížení kolísání řezných sil. Z těchto důvodů se pro osové nástroje obvykle volí šroubovitý tvar drážky, jejíž vhodný úhel sklonu zlepšuje účinek rovnoměrnosti práce nástroje. Dalším požadavkem může být, aby osová složka řezné síly působila směrem do upínací stopky, což je možno splnit volbou úhlu sklonu drážky. [2]

Profil řezných drážek je takový, aby při určitém úhlu sklonu šroubovice (γ_f) a úhlu špičky ε_f vzniklo ostří. Hlavní ostří jsou spojena příčným (spojovacím) ostřím, které prochází jádrem vrtáku. Příčné ostří je tedy průnikem ploch hlavních hřbetů a úhel sklonu příčného ostří bývá obvykle 55 až 60°. [16]

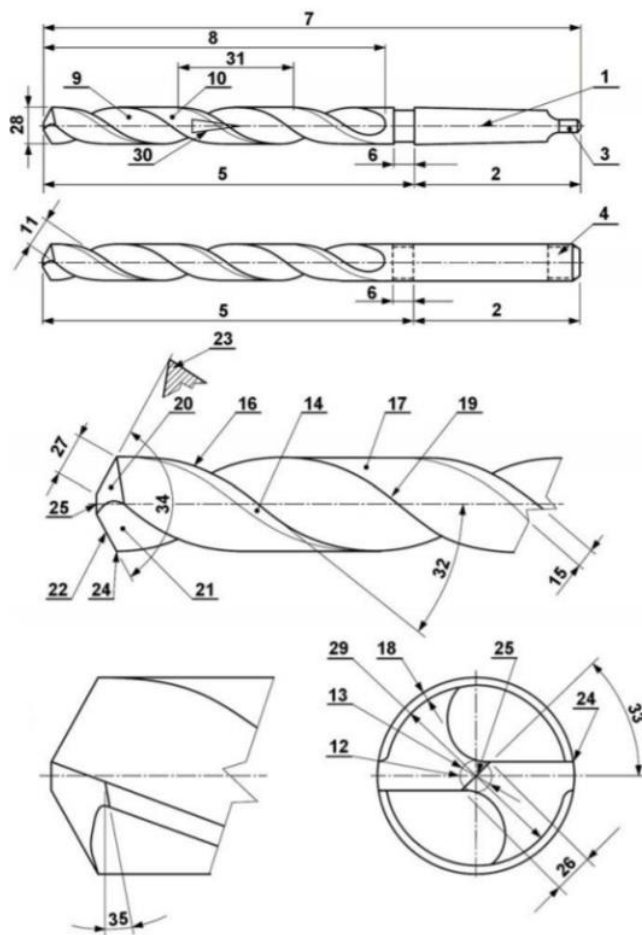
V řezu kolmém na osu nástroje je vidět spojení obou žebor pomocí jádra vrtáku. Jádro vrtáku má běžně průměr 0,1 až 0,2x D , kdy D je průměr vrtáku. Jádro se směrem ke stopce zvětšuje velmi malým úkosem (např. kuželovitost 1:130). Jádro má vliv na pevnost vrtáku v krutu a ve vzpěru, proto se při vrtání těžkoobrobitelných materiálů používají nástroje se zesíleným jádrem. Velikost jádra a příčného ostří je velmi důležitá, jelikož má zásadní vliv na velikost síly posuvu, jak je vidět



Obrázek 8: Závislost síly posuvu F_f na uvažovaném bodu ostří vrtáku [6]

na obrázku níže. Zvětšení průměru jádra o 10 % může způsobit i dvojnásobný nárůst síly posuvu, proto se příčné ostří upravuje různými druhy výbrusů, které vedou ke zmenšení jádra vrtáku. [6] [9] [16]

Těleso vrtáku má na jeho obvodu vodící fazetky, které slouží pro vedení vrtáku v otvoru. Při vrtání hlubokých otvorů je nutné, aby se směrem ke stopce zmenšoval průměr, na kterém jsou umístěny vodící fazetky, tím se zmenší tření mezi vodícími fazetkami a stěnou otvoru. Zpětná kuželovitost (např. 1:1000) je nutná zejména při vrtání materiálů s výraznou teplotní roztažností, špatnou tepelnou vodivostí nebo s obecně špatnou obrobiteľností. Při malé zpětné kuželovitosti hrozí, že se vrták v otvoru sevře a dojde k jeho zničení. [9] [16]

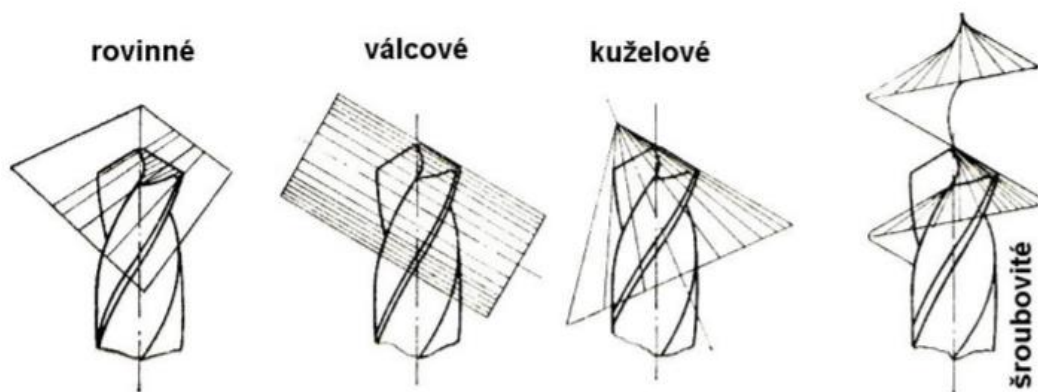


Obrázek 9: Detailní popis šroubovitého vrtáku [1] [14] [18]

1	Osa
2	Stopka
3	Vyřázeč
4	Unášec
5	Těleso
6	Krček
7	Celková délka (l_1)
8	Délka drážky (l_2)
9	Drážka
10	Plocha vedlejšího hřbetu
11	Šířka plochy vedlejšího hřbetu
12	Jádro
13	Tloušťka (průměr) jádra
14	Fazetka (první vedlejší hřbet)
15	Šířka prvního vedlejšího hřbetu
16	Vedlejší ostří
17	Odlehčení
18	Hloubka odlehčení
19	Pata
20	Hlavní hřbet
21	Čelo
22	Hlavní ostří
23	Břit
24	Špička (vnější)
25	Příčné (spojovací) ostří
26	Délka příčného ostří
27	Délka hlavního ostří
28	Průměr vrtáku
29	Průměr odlehčení
30	Kuželovitost (zpětná)
31	Stoupání šroubovice
32	Úhel stoupání šroubovitě drážky γ_f
33	Úhel příčného ostří
34	Úhel hrotu $2\alpha_f$
35	Úhel hřbetu α_f

2.5 Ostření vrtáků

Šroubovitě vrtáky mají poměrně složitou geometrii břitu, jelikož nástrojové úhly se mění v závislosti na poloze uvažovaného bodu ostří. Nepříznivá geometrie břitu se projevuje zejména v oblasti příčného ostří, kdy s přispěním nevhodných pracovních podmínek se výrazně zvyšuje krouticí moment stroje a posuvová síla. Záporné hodnoty úhlu čela γ_0 v oblasti příčného ostří a nulová řezná rychlost v ose nástroje jsou pro vrtání nepříznivé. Z těchto důvodů se u většiny současných šroubovitých vrtáků provádějí nejrůznější úpravy příčného ostří, případně se upravuje konstrukce nástroje tak, aby se příčné ostří odstranilo. Úpravy se provádějí zkrácením příčného ostří pomocí podbroušení a tím se zmenšuje i průměr jádra vrtáku. Úhly hlavního hřbetu mohou být broušeny podle rovinné, válcové, kuželové nebo šroubové plochy, jak je vidět na obrázku níže. [1] [9]



Obrázek 10: Způsoby podbroušení hlavního hřbetu šroubovitých vrtáků [1]

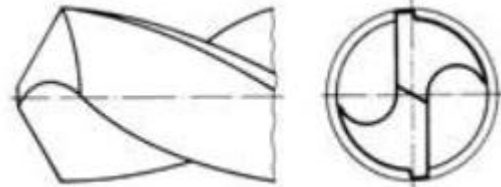
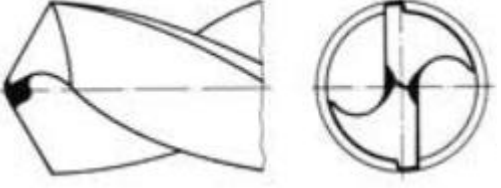
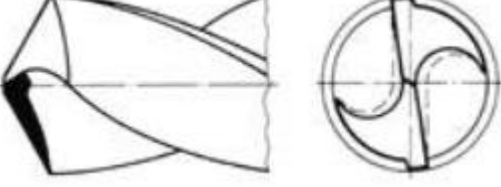
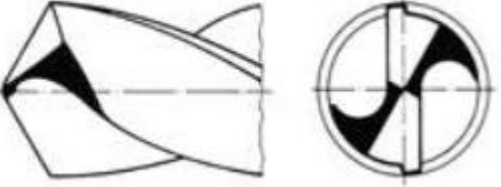
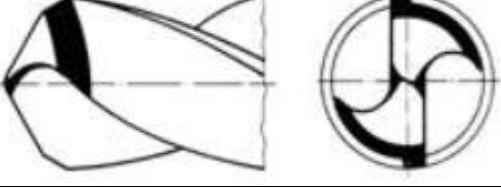

Výbrus (podbrus) hlavního hřbetu vrtáku s kuželovou plochou je velmi jednoduchý na provedení a je možné jej použít pro většinu vrtaných materiálů, kdy se změní úhel špičky ϵ_r a případně zkrátí příčné ostří. Výhodami kuželového výbrusu jsou dobrý odvod tepla z hlavního ostří, velká pevnost ostří a snadný způsob broušení. Při nesprávném broušení mohou vznikat problémy s horším středěním a velkým odporem v axiálním směru při vrtání těžkoobrobitelných ocelí. [19]

Šroubový výbrus vzniká současným pohybem translace a rotace vrtáku během broušení. Hřbetní plocha a příčné ostří mají tvar šroubovice, tím se sníží axiální tlaky, zvýší se středící schopnost, a je možné vrtat s vyšším posuvem. Dále se řezná část vrtáku může upravovat pomocí rovinného výbrusu, při kterém se vytvářejí fazetky na hlavních hřbetech nástroje. Fazetky mají zpravidla šířku o hodnotě poloviny jádra vrtáku a průnikem fazetek vzniká střed příčného ostří. Na jednom břitu vrtáku se mohou

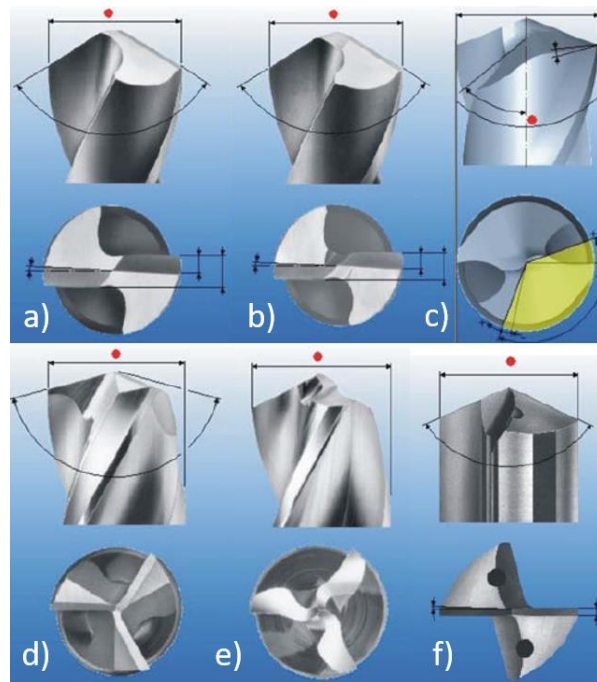
nacházet běžně až 3 fazetky (výbrus šesti rovinami na dvoubřitém vrtáku). Správným vybroušením těchto rovin se vrták velmi dobře středí, fazetky umožňují zvýšení posuvu a tím i zvýšení výkonu vrtání. [19]

Jednotlivé výbrusy používané při ostření šroubových vrtáků jsou uvedeny v normě DIN 1412. Následuje souhrn a popis základních typů výbrusů, které vedou ke zkrácení příčného ostří.

Tabulka 3: Tvary výbrusů u šroubových vrtáků dle DIN 1412 [9] [20]

<p>Tvar N</p> <p>Podbroušená kuželová plocha, všeobecné použití při vrtání ocelí, barevných kovů i umělé hmoty apod.</p>	
<p>Tvar A</p> <p>Velmi dobré středění a podbrus se zlepšeným výkonem.</p>	
<p>Tvar B</p> <p>Pro vrtání ocelí s vyšší pevností, nedochází k zaseknutí tenkostěnných obrobků, vyšší radiální síla.</p>	
<p>Tvar C</p> <p>Silné jádro pro houževnaté, tvrdé, korozivzdorné materiály, lepší dělení a odvod třísek (křížový výbrus).</p>	
<p>Tvar D</p> <p>Pro šedou (LLG) a temperovanou litinu a výkovky, ochrana fazetek u špičky vrtáku, vyšší trvanlivost nástroje.</p>	
<p>Tvar E</p> <p>Vrtání plechů a měkkých materiálů, rovné dno otvoru, malá tvorba ořepu u děr, citlivý proti rázům.</p>	

Uvedené druhy výbrusů (podbrusů) nezachycují všechny možné aplikace speciálních metod ostření vrtáků. Výrobci nástrojů produkují celou řadu modifikací a kombinací základních výbrusů, proto jsou pro znázornění uvedeny další tvary s příslušným popisem, jenž jsou uvedeny například v příručce pro CNC nástrojové brusky od společnosti Walter AG. [21]



Obrázek 11: Příklad dalších výbrusů monolitních vrtáků [21]

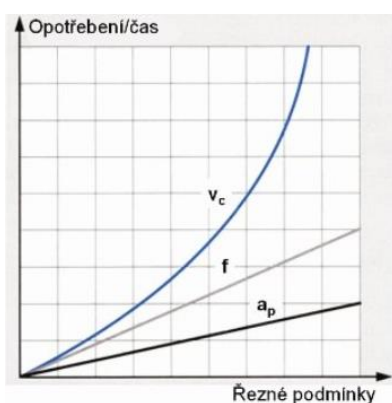
a) Rovinný výbrus s fazetkami, b) výbrus šesti rovinami, c) šroubovitý výbrus od společnosti Hertel, d) středící vrták s rovinným výbrusem, e) výbrus od společnosti Hertel, f) speciální výbrus vrtáku s přímou drážkou od společnosti Walter AG. [21]

3 Opotřebení břitu nástroje pro vrtání

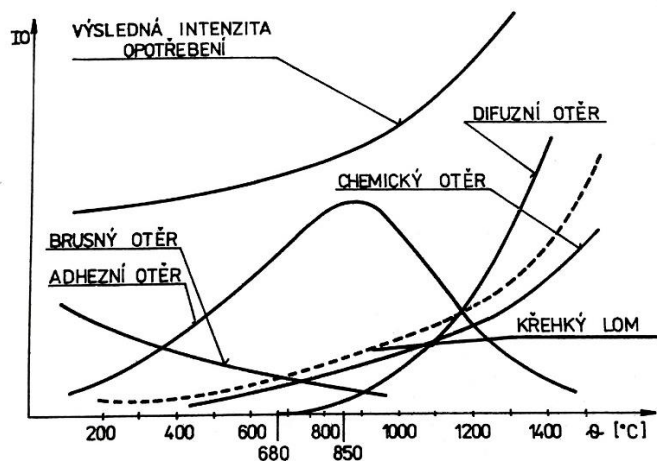
Během obrábění dochází k opotřebování nástroje, kdy se postupně mění jeho funkční plochy. Hlavním činitelem opotřebení břitu je vysoká teplota, jež může dosáhnout až teploty tavení obráběného materiálu. Kombinace vysoké teploty s vysokým tlakem způsobuje změnu mechanických vlastností nástrojového materiálu. Z mechanických vlastností lze sledovat zejména závislost tvrdosti nástrojového materiálu na teplotě. Pro rychlořezné oceli je limitní pracovní teplota udávána v rozmezí 550 až 630 °C a pro slinuté karbidy 880 až 1080 °C. [5]

Proces opotřebení nástroje závisí na mnoha faktorech a lze ho charakterizovat základními mechanismy:

- Abrasivní (brusný) otěr – tvrdší částice obráběného materiálu uvolňují měkčí částice z materiálu nástroje.
- Adhezní (adhezně–únavový) otěr – v důsledku vysokých teplot a tlaků dochází ke vzniku a porušování mikrosvarových bodových spojů.
- Difuzní otěr – přenos atomů z obráběného do nástrojového materiálu a obráceně (SK, ŘK a další materiály pracující za vyšší teploty)
- Chemický otěr (oxidace) – opotřebení nově vzniklých vrstev na povrchu nástroje v důsledku difuze a řezného prostředí.
- Plastická deformace – při překročení limitní teploty dochází k rychlému poklesu tvrdosti nástrojového materiálu a k odchodu zplastizované povrchové vrstvy (lavinovité opotřebení).
- Křehký lom – vylomení větší části břitu v důsledku vysokého mechanického zatížení. [5] [22]



Obrázek 12: Vliv řezných podmínek na opotřebení [64]



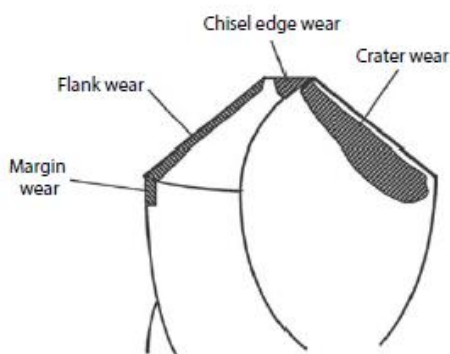
Obrázek 13: Vliv teploty na jednotlivé mechanismy opotřebení [5]

Nástroje z rychlořezné oceli se opotřebovávají zejména abrazivním a adhezním otěrem. Význam chemického otěru vzhledem k pracovním teplotám u rychlořezných ocelí při obrábění je malý a vzhledem k jejich houževnatosti nejsou obvyklé křehké lomy. Plastická deformace na nástroji se uplatňuje převážně při obrábění materiálů se špatnou tepelnou vodivostí. [5]

Při obrábění slinutými karbidy je možno sledovat všechny uvedené mechanismy opotřebení. Adhezní otěr převládá do teploty 850 až 900 °C. Při práci nad uvedenou teplotou významně roste otěr difuzní, chemický, jak je vidět na obrázku výše. [5]

3.1 Formy opotřebení

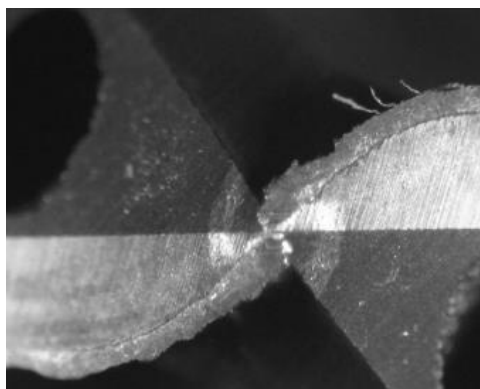
Hlavní formou opotřebení břitu obráběcích nástrojů je plocha na hřbetu, případně žlábek na čele, kdy obvykle jedna z forem opotřebení převažuje nad ostatními. Základní druhy opotřebení monolitního vrtáku jsou uvedeny na obrázku níže. [6] [15]



- Opotřebení na hřbetu (flank wear)
- Opotřebení na příčném ostří (chisel edge wear)
- Opotřebení na vedlejším hřbetu (margin wear)
- Žlábek na čele (crater wear)

Obrázek 14: Oblasti opotřebení vrtáku [6]

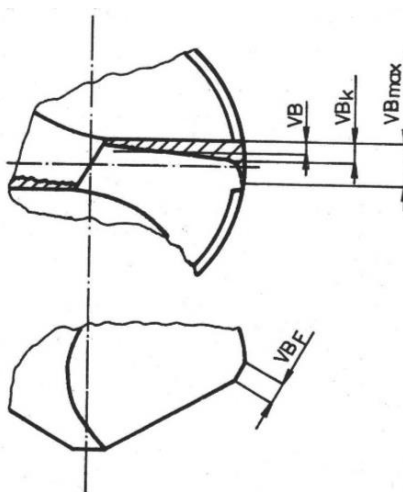
Opotřebení na hřbetní ploše vzniká zejména abrazivním otěrem a plastickou deformací. Tyto mechanismy jsou způsobeny nesprávným broušením hlavního hřbetu vrtáku. S rostoucím opotřebením a třením na hlavním hřbetu vrtáku se zvyšuje převážně teplota, což vede ke snižování tvrdosti na hřbetu a dalšímu opotřebení. Opotřebení na vedlejším hřbetu ovlivňuje především přesnost vrtaných děr, které je způsobeno tepelným zatížením a difuzním otěrem. Podobné mechanismy opotřebení se uplatňují i u žlábků na čele nástroje. Žlábek na čele snižuje pevnost ostří, což může vést ke křehkému porušení břitu. [6]



Obrázek 15: Příklad opotřebení na příčném ostří a hřbetu [6]

3.2 Hodnocení opotřebení

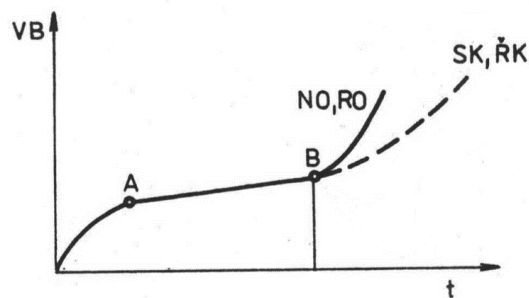
Charakteristické formy opotřebení lze kvantifikovat podle jednotlivých kritérií, kdy se vyhodnocuje jejich velikost. Nejvýznamnějšími měřenými veličinami opotřebení jsou VB (šířka plochy opotřebení na hřbetu) a KT (hloubka žlábků na čele). U plochy opotřebení na hřbetu se měří její šířka VB a tvar plochy u vrtáků je ovlivněn měnící se řeznou rychlostí podél ostří. U vrtáků se mohou vyhodnocovat různé parametry opotřebení, ale nejčastěji se jedná o maximální šířku před výrazným zvýšením opotřebení na obvodu vrtáku VB_k (bez lavinovitého opotřebení). Další parametry plochy opotřebení na hřbetu mohou být VB_{max} a přechodové opotřebení mezi hlavním a vedlejším ostřím vrtáku VB_F . [5]



Obrázek 16: Různé parametry šířky opotřebené plochy na hřbetu a špičce vrtáku [5]

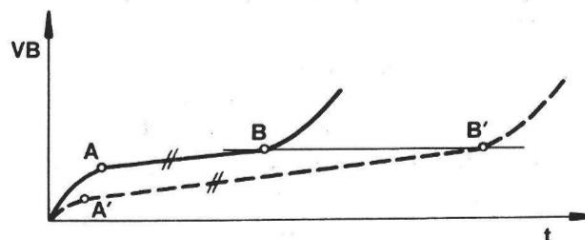
Na obrázku níže je uveden charakteristický průběh velikosti opotřebení VB na čase obrábění. Křivku lze rozdělit na tři části. V první oblasti (do bodu A) dochází k velkému měrnému tlaku, který je způsobem stykem vrcholků mikronerovností hlavního hřbetu nástroje s přechodovou plochou obrobku. Při srovnání vrcholků mikronerovností

na hřbetu nastává rovnoměrně rostoucí opotřebení až do bodu B. Při překročení limitní pracovní teploty dochází k lavinovitému opotřebení břitu. Růst křivky od bodu B je ovlivněn poklesem tvrdosti nástrojového materiálu při rostoucí teplotě. V okolí bodu B obvykle dochází k výměně nástroje. U nástrojů ze slinutých karbidů nebo řezné keramiky bývá bod výměny nástroje stanoven za bodem B, jelikož tyto materiály mají menší tendenci k lavinovitému opotřebení. [5]



Obrázek 17: Časová závislost opotřebení pro různé nástrojové materiály [5]

Kvalita ostření má vliv na závislost opotřebení VB na čase. Čárkovaná křivka představuje kvalitně naostřený nástroj, který se liší od druhého nástroje (plná křivka) zejména v kvalitě povrchu hlavního hřbetu. Vysoká drsnost hřbetu a narušení povrchové vrstvy hřbetu způsobují u křivky, která je plně vytažena, prudký nárůst opotřebení. Nevhodná kvalita hřbetu může být v případě monolitních vrtáku způsobena například vysokým tlakem na nástroj při broušení nebo velkou zrnitostí kotouče. [15]



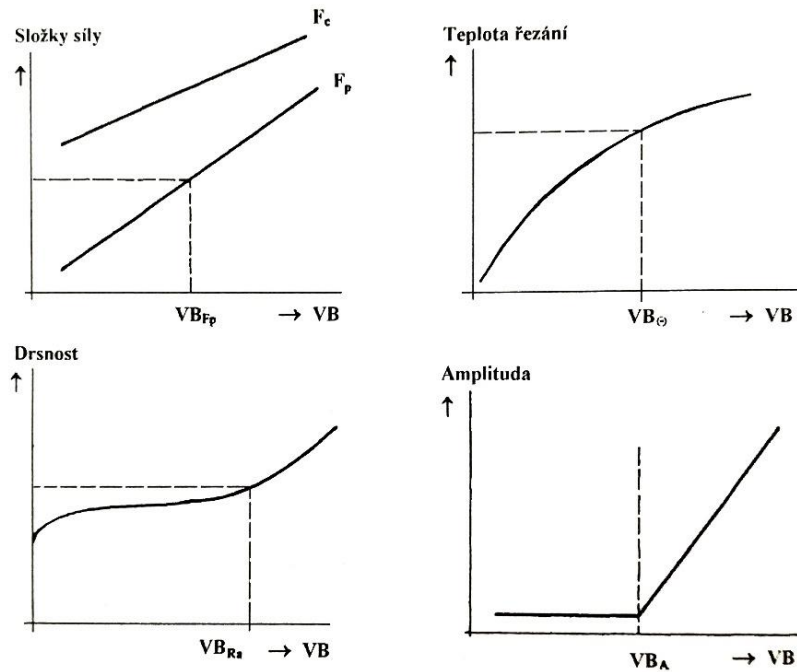
Obrázek 18: Závislost opotřebení VB na čase pro různou kvalitu ostření nástrojů [15]

Další kritéria hodnocení opotřebení lze vztáhnout na uvedené hlavní parametry VB nebo KT. Časová závislost hloubky žlábků na čele KT má charakteristický exponenciální průběh. Uvedené formy opotřebení mají vliv na trvanlivost nástroje, která vyjadřuje u monolitních vrtáků dobu práce nástroje mezi dvěma ostřeními (doba mezi výměnou nástroje) do stanoveného kritéria opotřebení břitu. Životnost nástroje u přeastřovaných nástrojů je dána vztahem:

$$Z = (z_0 + 1) \cdot T, \quad (4.1)$$

kde Z je životnost nástroje [min], T je trvanlivost nástroje [min], z_o je počet možných přestřehů bříty. [15]

Při procesu otupování dochází ke geometrickým změnám tvaru bříty obráběcího nástroje, které ovlivňují řezné síly, vibrace, drsnost povrchu, teplotu řezání apod. Následují typické závislosti uvedených charakteristik na šířce opotřebené plochy hřbetu VB . Tyto závislosti jsou předem omezené tzv. limitní hodnotou otupení nástroje. [23]



Obrázek 19: Závislost charakteristik procesu řezání na šířce opotřebené plochy na hřbetu [23]

4 Obrobitelnost

Obrobitelnost je schopnost materiálu být obráběn určitou technologií, určitým nástrojem, určitými reznými podmínkami, rezným prostředím apod. S obrobitelností úzce souvisí řezivost, kterou lze popsat jako schopnost nástroje obrábět danou technologií, daný obráběný materiál, danými reznými podmínkami, v daném rezném prostředí apod. [5]

Charakteristiky obrobitelnosti a řezivost lze rozdělit na absolutní a relativní. Absolutní obrobitelnost (řezivost) je stanovena pomocí funkčního vztahu nebo určité velikosti dané veličiny, které souvisejí s obrobitelností. Relativní obrobitelnost (řezivost) je charakterizována indexy obrobitelnosti, jenž udávají poměr velikostí dané veličiny, která se vztahuje k obráběnému materiálu, případně nástroji. Obrobitelnost a řezivost se hodnotí zejména s ohledem na intenzitu opotřebení nástroje. Dalšími způsoby hodnocení může být z hlediska teplotního, silového, technologického a kvalitativního. [5]

Vlastnosti materiálu obrobku jsou ovlivňovány především množstvím přísadových prvků, tepelným zpracováním, mechanickými vlastnostmi apod. Obráběné materiály se dělí do šesti základních skupin podle normy ČSN ISO 513, kdy každá z uvedených skupin se vyznačuje odlišnými vlastnostmi z hlediska jejich obrobitelnosti. Uvedená mezinárodní norma pomáhá s klasifikací rezných materiálů k obrábění podle jejich použití. [24] [25]

Tabulka 4: Rozdělení obráběných materiálů a jejich barevné označení [24] [25]

Skupina	Obráběný materiál
P	Ocel: všechny druhy oceli a lité oceli, vyjma korozivzdorné oceli s austenitickou strukturou – dlouhá a plynulá tříška.
M	Korozivzdorná ocel: korozivzdorná austenitická a austeniticko/feritická ocel a litá ocel – dlouhá a střední tříška.
K	Litina: šedá litina (s lupínkovým grafitem), tvárná litina (s kuličkovým grafitem), temperovaná litina – krátká a drobná tříška.
N	Neželezné kovy: hliník a ostatní neželezné kovy, nekovové materiály.
S	Superslitiny a titan: žáruvzdorné speciální slitiny na základě železa, niklu a kobaltu, titan a titanové slitiny.
H	Tvrdé materiály: kalená ocel, kalené litinové materiály, tvrzená litina.

4.1 Obrobitelnost korozivzdorných ocelí

Korozivzdorné neboli nerezové oceli obsahují přibližně více než 12 % chromu, který způsobuje korozní odolnost za normálních teplot. Korozivzdorné oceli se rozdělují podle základních typů fází na feritické, martenzitické, austenitické a duplexní. Obtížné

na obrábění jsou především Cr–Ni, Cr–Ni–Mo, Cr–Mn–Ni a další austenitické oceli, které mohou být dolegovány dusíkem. [26]

U korozivzdorných ocelí lze obecně obrobiteľnost zlepšit přidáním například síry, olova, selenu a dalších prvků, ale zároveň tím dojde ke zhoršení zejména mechanických vlastností ocelí. Tyto přísady vytvářejí sloučeniny, které mají nízkou rozpustnost v matici, a slouží jako mazivo při styku nástroje s obráběným materiálem.

Pro obrábění korozivzdorných ocelí se obvykle doporučuje:

- nižší řezné rychlosti a menší úběr materiálu než u uhlíkových ocelí,
- aplikace tuhých nástrojů k zabránění vibrací,
- volba malého posuvu ke zlepšení kvality povrchu obráběného materiálu,
- použití nástrojů s malým poloměrem ostří a nízkou drsností povrchu k zabránění vzniku nárůstku,
- dostatečné chlazení místa řezu procesní kapalinou. [6]

4.1.1 Feritické a martenzitické korozivzdorné oceli

Feritické korozivzdorné oceli obsahují 13 až 30 hm. % chromu, jenž má feritotvorný účinek. Dále mohou být legovány molybdenem, titanem nebo niobem pro zlepšení odolnosti proti korozi nebo svařitelnosti. Feritické oceli obsahují nízké množství uhlíku do 0,1 hm. % a jsou obecně dobře obrobiteľné. Nicméně jejich obrobiteľnost klesá s rostoucím obsahem chromu. [6] [26]

Martenzitické korozivzdorné oceli mohou obsahovat spolu s chromem (12 až 18 hm. %) i molybden nebo nikl, které slouží ke zlepšení jejich pevnosti. Při rostoucím obsahu uhlíku, jehož obsah je obvykle od 0,1 do 1,5 hm. %, se zvyšuje poměr abrazivních karbidů chromu ve struktuře, a tím se snižuje obrobiteľnost oceli. Obrobiteľnost martenzitických ocelí je zlepšována obsahem volného feritu ve struktuře. [6] [8] [26]

4.1.2 Austenitické korozivzdorné oceli

Austenitické oceli se řadí mezi nejpoužívanější korozivzdorné nebo žáruvzdorné oceli. Typickým příkladem je chromniklová ocel s obsahem 18 % chromu, 8 % niklu a nízkým obsahem uhlíku. Korozní odolnost a jiné vlastnosti těchto ocelí se zlepšují s obsahem niklu, jenž je spolu s uhlíkem významným austenitotvorným prvkem. S obsahem molybdenu nebo titanu dochází rovněž ke zlepšení vlastností. Dalšími austenitickými oceli jsou chromniklmolybdenové, chrommangandusíkové a jiné.

Velmi nepříznivě na obrobitelnost působí obsah dusíku, který zvyšuje tvrdost ocelí. Austenitické oceli jsou paramagnetické, což je nutné zohlednit například při upnutí obrobku. Klasická chromniklová austenitická ocel má pevnost v tahu okolo 600 MPa, jenž lze významně zvýšit precipitační vytvrzením. [26]

Špatná obrobitelnost je způsobena především vyšší pevností v tahu a ve stříhu, vyšší houževnatostí a nízkou tepelnou vodivostí. Kombinace vlastností korozivzdorných ocelí často vyvolává velké řezné síly na břit nástroje a zvýšenou teplotu řezání, které vedou k vyšší intenzitě opotřebení nástroje. Obrobitelnost austenitických korozivzdorných ocelí zhoršuje schopnost zpevňování materiálu při řezání, která je způsobena adhezí měkkých a houževnatých částic obráběného materiálu k nástroji. U některých ocelí může být špatná obrobitelnost způsobena i přítomností tvrdých složek (karbidů), které působí abrazivně na břit nástroje. Během obrábění korozivzdorných ocelí byla rovněž zaznamenána tvorba nárůstku a špatná kvalita obrobeného materiálu. [6] [8]

Austenitické oceli tvoří dlouhé, houževnaté a spojitě třísky, které se obtížně dělí. Přidáním síry lze sice zlepšit obrobitelnost, ale zároveň dojde ke snížení odolnosti proti korozi. Při obrábění dochází ke vzniku velkého množství tepla. [24]

4.1.3 Duplexní korozivzdorné oceli

Jedná se o dvoufázové oceli, jejichž strukturní skladba nabízí vhodnou kombinaci vlastností, které jsou dány výhodami obou matričních fází. Duplexní oceli se vyznačují převážně vysokou pevností v tahu a zároveň vysokou odolností proti korozi. Do této skupiny patří oceli austeniticko-feritické, martenziticko-austenitické a martenziticko-feritické. [26]

V důsledku vysoké meze pevnosti je obrobitelnost velmi špatná. U austeniticko-feritických ocelí přispívá podíl feritu ke zlepšení obrobitelnosti. Během obrábění mohou vznikat soudržné třísky, kdy při jejich zasekávání může dojít ke zvyšování řezných sil. Výrobce Sandvik Coromant doporučuje použití menšího úhlu nastavení, aby nedocházelo ke vzniku značného množství tepla a rychlému opotřebení v podobě žlábků na čele. [24]

5 Monolitní vrtáky pro korozivzdorné oceli

Následující kapitola je věnována zmapování nabídky různých výrobců vrtacích nástrojů. Výběr je zúžen o nástroje, které jsou určeny pro vrtání těžkoobrobitelných materiálů se specializací na korozivzdorné oceli. Hledání je omezeno na monolitní šroubovitě vrtáky ze slinutého karbidu, jenž jsou pravořezné (pravotočivé) a mají pravý smysl stoupání šroubovitě drážky.

Další omezující počáteční podmínky jsou způsobeny proveditelností a opakovatelností experimentu, proto je zvolen shodný průměr řezné části s průměrem stopky 8 mm. Pro porovnání jednotlivých vrtáků je zvolena hloubka otvorů menší než trojnásobek průměru řezné části (tzv. do $3 \times D$). Jako základní obráběný materiál je vybrána austenitická korozivzdorná ocel, jenž má velmi široké uplatnění převážně v potravinářském průmyslu. Pro vytváření otvorů do plného materiálu je z důvodu horší tepelné vodivosti v korozivzdorných ocelích nutné použití dostatečné množství procesní kapaliny v místě řezu, a proto se jeví jako nejvhodnější použití nástrojů s vnitřním přívodem procesní kapaliny.

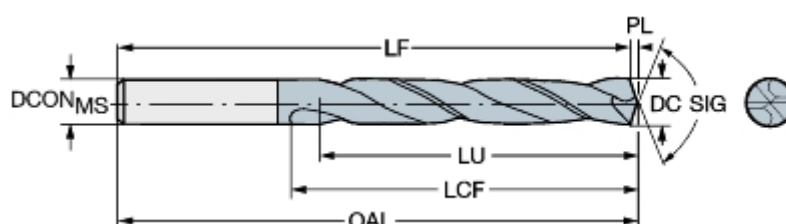
Pokud není uvedeno jinak ve výkresu příslušného vrtáku je označována l_1 jako celková délka vrtáku, l_2 jako délka drážky, d_1 jako jmenovitý průměr vrtáku, d_2 jako průměr stopky nástroje.

5.1 ISO 13399–1

Nejvýznamnější výrobci nástrojů, jako jsou například společnosti Sandvik Coromant, Walter AG, Ceratizit Group a Mitsubishi Materials, uvádějí údaje o obráběcích nástrojích dle normy ISO 13399–1 (Cutting tool data representation and exchange). Tato norma sjednocuje strojově čitelná data, která se týkají obráběcích nástrojů a upínačů. Cílem je poskytnout mechanismus schopný popsat údaje o produktu a zároveň vytvořit prostředek pro snadnou výměnu dat. Příkladem může být výměna dat mezi systémy CAD (Computer-aided design), CAM (Computer-aided manufacturing), CAE (Computer-aided engineering) a dalšími softwary, které se zabývají správou nástrojů, správou dat o produktech, o plánování výroby apod. Používání normy ISO 13399 zavedla společnost Sandvik Coromant, aby snížila náklady na spravování informací o nástrojích a zefektivnila výrobu. [27]

Tabulka 5: Vybrané označení z normy ISO 13399-1 [27]

Parametr	Název
SIG	Úhel hrotu $2\alpha_r$
FHA	Úhel stoupání šroubovitě drážky γ_f
DC	Jmenovitý průměr vrtáku d_1
DCONMS	Průměr stopky d_2
OAL	Celková délka l_1
LCF	Délka drážky l_2
LF	Funkční délka
LU	Doporučená hloubka vrtané díry nebo otvoru (činná délka)
PL	Vzdálenost špičky
LS	Délka stopky

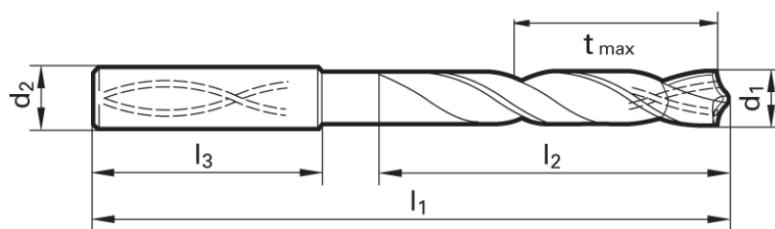


Obrázek 20: Příklad značení rozměrů a geometrie vrtacího nástroje podle ISO 13399-1 [27]

5.2 Gühring s.r.o.

Nejvhodnější typ vrtáku pro korozivzdorné materiály od společnosti Gühring s.r.o. může být RT 100 VA ze série 8510. Jedná se o dvoubřitý šroubovitý vrták ze slinutého karbidu s vnitřním axiálním chlazením, který je určen pro obrábění korozivzdorných ocelí, titanu a titanových slitin, niklových slitin (obchodní názvy Inconel, Hastelloy, Monel). Mezi jeho přednosti patří vybroušení příčného ostří, rovinný výbrus hlavního hřbetu nástroje a rovné hlavní ostří. Vrták RT 100 VA je vyráběn dle normy DIN 6537 K s hladkou válcovou stopkou typu HA podle DIN 6535 a tolerance průměru vrtáku je m7. [28]

Výrobce Gühring s.r.o. doporučuje pro monolitní nástroje ze slinutého karbidu, které jsou určeny pro vrtání korozivzdorných ocelí povlaky nanoA, Sirius, Endurum. Povlak nanoA na bázi TiAlN se osvědčil pro vrtání korozivzdorných austenitických ocelí. Kromě korozivzdorných ocelí lze nástroj s tímto povlakem zčásti použít pro vrtání slévarenských slitin a slitin na bázi titanu, niklu, kobaltu a chromu. Povlak nanoA se na základě upraveného složení vyznačuje vyšší termochemickou odolností než například TiAlN. Vícevrstvá struktura povlaku umožňuje teplotu použití do 900 °C a dosahuje tvrdosti 3300 HV0,05. [28]

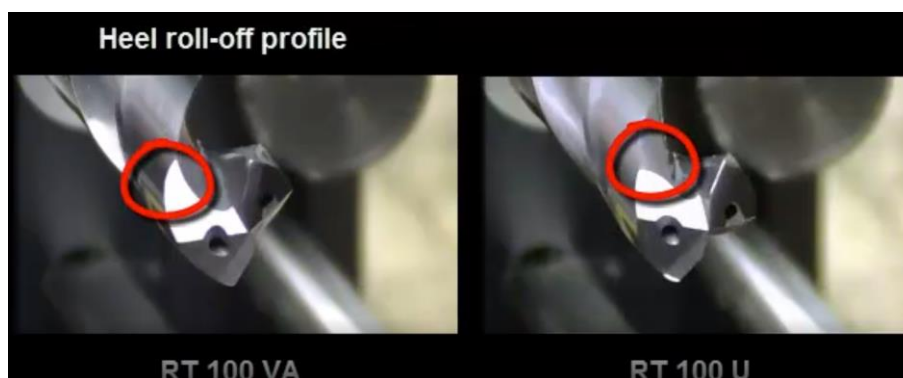


Obrázek 21: Vrták RT 100 VA ze série 8510 [28]

Tabulka 6: Vrták typu RT 100 VA ze série 8510 - geometrie, rozměry a doporučené řezné podmínky pro austenitickou korozivzdornou ocel [28]

$2\alpha_r$	d_1	d_2	l_1	l_2	l_3	t_{max}	v_c	f
[°]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[m/min]	[mm/ot]
140	8 m7	8	79	41	36	29	60	0,08 až 0,1

Mezi další vhodné vrtáky podle předem stanovených podmínek z nabídky společnosti Gühring s.r.o. patří typ RT 100 U ze série 2477 a série 5510. Tyto nástroje se od série 8510 odlišují v geometrii a v použitém povlaku nanoFIRE na bázi TiN, jenž umožňuje všestranné vrtání od konstrukčních ocelí, hliníkových slitin, přes litinu s lupínkovým grafitem, až po korozivzdorné ocele a slitin na bázi titanu. [28]



Obrázek 22: Porovnání vybroušení druhého hlavního hřbetu RT 100 VA a RT 100 U [29]



Obrázek 23: Porovnání tvaru drážky RT 100 VA a RT 100 U [29]

5.3 Hoffmann Group

Dalším významným výrobcem vrtacích nástrojů je německá společnost Hoffmann Group. Pro vrtání austenitické korozivzdorné oceli doporučuje dvoubřitý šroubovitý vrták ze slinutého karbidu pod kódovým označením 122380 8, jenž je vyráběn dle normy DIN 6537 K, a jehož válcová hladká stopka je vyráběna dle DIN 6535 HA. [30]

Vrták je vybaven dvěma spirálovými kanálky pro vnitřní distribuci procesní kapaliny s maximálním tlakem 25 bar. Kromě korozivzdorných ocelí umí též obrobít konstrukční oceli o běžné pevnosti, hliníkové slitiny a slitiny titanu. Geometrie vrtacího nástroje je upravena o zesílené jádro a speciální výbrus hrotu, kvůli kterému má příčné ostří přesnější středění. Přímé hlavní ostří se zaoblenou špičkou a upraveným tvarem čela umožňuje vytvářet krátkou třísku. Vrták je chráněn tenkou vrstvou na bázi TiAlN a tolerance průměru stopky vrtáku je h7. [30]



Obrázek 24: Vrták 122380 [30]

Tabulka 7: Vrták 122380 8 od společnosti Hoffmann Group – geometrie, rozměry a doporučené řezné podmínky pro austenitickou korozivzdornou ocel [30]

$2\alpha_r$	d_1	d_2	l_1	l_2	t_{max}	v_c	f
[°]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[m/min]	[mm/ot]
135	8	8 h7	79	41	29	55	0,12

Mezi další vhodné nástroje pro vrtání korozivzdorných ocelí od stejného výrobce může patřit i dvoubřitý vrták ze slinutého karbidu 122404 8, který je velmi podobný vrtáku 122380 8 až na úhel hrotu $2\alpha_r = 140^\circ$ a menší šířku vedlejšího hřbetu, jenž rozšiřuje drážku a umožňuje lepší odvod třísek. Pro vrták je doporučována nižší řezná rychlost $v_c = 45$ m/min a posuv $f = 0,1$ mm/ot. [30]



Obrázek 25: Vrták 122404 [30]

Výrobce Hoffmann Group uvádí ve svém katalogu i zajímavou alternativu, která má široké uplatnění napříč všemi běžně obráběnými materiály. Monolitní vrtací nástroj ze slinutého karbidu s povlakem TiAlN patří do série Master Steel a je označen

kódem 122435 8. Jedná se o vrták, který je opatřen třemi břity a byl vyvinut pro použití s vyšším posuvem. Geometrie břitu umožňuje stabilní řez a patentovaný výbrus hrotu zjednodušuje odvod a odlamování třísek. Příčné ostří tohoto nástroje napomáhá udržet vhodnou válcovitost zhotoveného otvoru a úhel hrotu $2\kappa_r$ netvoří značný ořep u průchozích děr. [30]



Obrázek 26: Vrták 122435 [30]

Tabulka 8: Vrták 122435 8 od společnosti Hoffmann Group – geometrie, rozměry a doporučené řezné podmínky pro austenitickou korozi-vzdornou ocel [30]

$2\kappa_r$	d_1	d_2	l_1	l_2	t_{max}	v_c	f
[°]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[m/min]	[mm/ot]
145	8	8	79	41	29	60	0,37

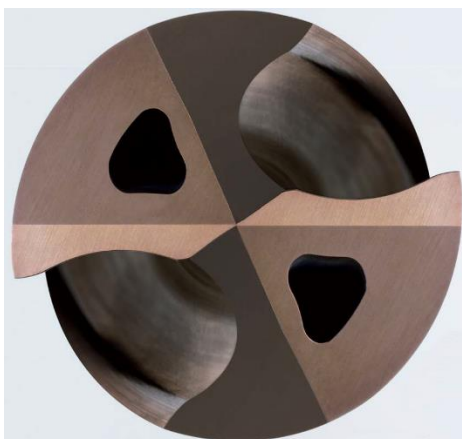
5.4 Mitsubishi Materials

Japonská společnost Mitsubishi Materials nabízí ve svém portfoliu výrobků několik vrtacích nástrojů podle požadovaných kritérií. Vrtáky ze série WSTAR MMS jsou navrženy pro vytváření neprůchozích otvorů nebo děr do korozi-vzdorných ocelí a jsou vybaveny vnitřními kanálky se speciální tvarem tzv. „TRI-cooling“, které umožňují větší průtok a lepší směr proudění procesní kapaliny. Při použití této technologie je možné snížit teplotu břitu nástroje. Hlavní ostří má konkávní tvar, jenž by mělo zvyšovat pevnost břitu nástroje. Podle informací od výrobce vybroušená špička nástroje snižuje měrný řezný odpor obráběného materiálu. Nástroje z této série jsou opatřeny PVD povlakem. [31]

Vybraný monolitní vrtací nástroj ze slinutého karbidu se nazývá MMS0800X3DB a je používán výhradně pro obrábění korozi-vzdorných ocelí. Tolerance řezné části vrtáku činí 0 až -0,022 mm, což odpovídá přibližně toleranci h8. V následující tabulce jsou uvedeny jeho bližší specifikace.

Tabulka 9: Vrták MMS0800X3DB od společnosti Mitsubishi Materials – geometrie, rozměry a doporučené řezné podmínky pro austenitickou korozi-vzdornou ocel [32]

SIG	FHA	DC	DCON	OAL	LCF	LF	LU	PL	v_c	f
[°]	[°]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[m/min]	[mm/ot]
140	30	8	8	91,5	41,5	90	25,5	1,5	80	0,19



Obrázek 27: Vrták MMS0800X3DB [31]

Další možností pro vrtání korozivzdorné oceli od výrobce Mitsubishi Materials je nástroj s označením MVS0800X03S080, kterým lze také obrábět konstrukční oceli, litiny, hliníkové a titanové slitiny a další špatně obrobitelné materiály. Hlavní odlišností oproti předchozímu vrtáku spočívá v nanášení PVD povlaku na bázi Al–Ti–Cr–N, jenž napomáhá k větší teplotní odolnosti a tvrdosti nástroje. Vrták je dále vybaven dvěma vodícími fazetkami na jednom vedlejším hřbetu. Pro tento vrtací nástroj je doporučována nižší rezná rychlost i nižší posuv než u předchozího nástroje. [33]

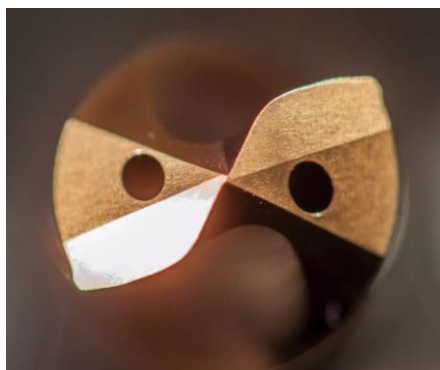
5.5 Sandvik Coromant

Švédský výrobce obráběcích nástrojů Sandvik Coromant má ve své nabídce celou řadu výrobků, které se zaměřují na těžkoobrobitelné materiály. Po uvážení všech požadavků v úvodu této kapitoly byl vybrán monolitní vrtací nástroj s označením 860.1–0800–024A1–MM 2214. Tento vrták patří do řady CoroDrill 860 – MM, mezi jejíž přednosti patří obrábění korozivzdorných materiálů, jako jsou austenitické, feritické a duplexní oceli.

Vrták ze slinutého karbidu je vybaven dvěma spirálovými kanálky s kruhovým průřezem pro vnitřní přívod procesní kapaliny. Nástroj je vyroben standardně dle normy DIN 6537 L a jeho válcová hladká stopka dle DIN 6535 HA. Pro nejlepší účinnost procesní kapaliny by měl její tlak dosahovat 20 bar a vrták je chráněn PVD povlakem na bázi TiAlN. [34]

Tabulka 10: Vrták 860.1–0800–024A1–MM 2214 od společnosti Sandvik Coromant – geometrie, rozměry a doporučené rezné podmínky pro austenitickou korozivzdornou ocel [34]

SIG	FHA	DC	DCON	OAL	LCF	LF	LU	PL	v_c	f
[°]	[°]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[m/min]	[mm/ot]
140	30	8 m7	8	79	41	77,7	25,3	1,3	48 až 72	0,1 až 0,14



Obrázek 28: Vrták z řady CoroDrill 860 – MM [35]

Další možností pro vrtání různých materiálů jedním nástrojem může být vrták z řady CoroDrill 860 – GM. Geometrie vrtáku je určena pro obrábění ocelí, korozivzdorných ocelí, litin a dalších těžkoobrobitelných materiálů. Vrták je vybaven dvojitou vodící fazetkou na obvodu nástroje, která přispívá ke zvýšení pevnosti špičky a snižuje tvorbu otřepů v díře. Podle výrobce by měl leštěný povrch drážek zlepšit odvádění třísek a tvar drážek zvyšuje pevnost jádra vrtáku. Povlak je tvořen vícevrstevným systémem na bázi TiAlSiN + TiSiN a povlakována je pouze část nástroje, jak je vidět na obrázku níže. [35]

Tabulka 11: Vrták 860.1–0800–025A1–GM X1BM od společnosti Sandvik Coromant – geometrie, rozměry a doporučené řezné podmínky pro austenitickou korozivzdornou ocel [36]

SIG	DC	DCON	OAL	LCF	LF	LU	PL	v_c	f
[°]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[m/min]	[mm/ot]
140	8	8 h6	79	41	77,6	25,5	1,5	30 až 46	0,18 až 0,22



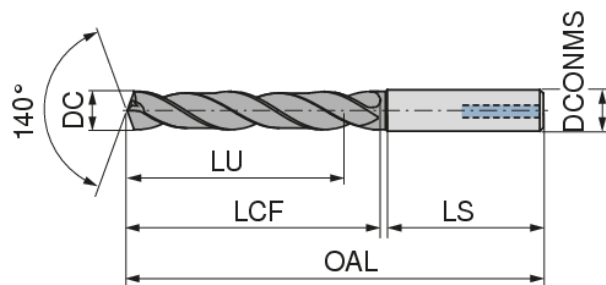
Obrázek 29: Vrták z řady CoroDrill 860 – GM [35]

5.6 Ceratizit Group (WNT Tools)

Společnost Ceratizit Group nabízí pod produktovou značkou WNT Tools celou řadu obráběcích nástrojů. Zabývá se výrobou monolitních nástrojů a vyměnitelných břitových destiček pro aplikace soustružení, frézování, výrobu závitů a vrtání. Od tohoto výrobce byl pro vytvoření otvorů v austenitické korozivzdorné oceli vybrán monolitní nástroj ze slinutého karbidu typu WPC VA. Dále lze tímto nástrojem obrábět především neželezné kovy a žáruvzdorné slitiny. Vrták je vhodný pro vrtání děr do hloubky $3x D$ a umožňuje vnitřní přívod procesní kapaliny skrz hlavní hřbet nástroje. Povrch nástroje je pokryt povlakem na bázi TiAlN. Těleso nástroje je broušeno podle normy DIN 6537 a hladká válcová stopka je zhotovena dle DIN 6535 HA. Výhodou tohoto nástroje je zejména nízká pořizovací cena oproti konkurenci. [37]

Tabulka 12: Vrták typu WPC VA od společnosti Ceratizit Group – geometrie, rozměry a doporučené řezné podmínky pro austenitickou korozivzdornou ocel [37]

SIG	DC	DCONMS	OAL	LCF	LU	LS	v_c
[°]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[m/min]
140	8	8	79	41	29	36	50



Obrázek 30: Vrták WPC VA [37]

Dalšími dvěma novinkami pod značkou WNT Tools v oblasti obrábění těžkoobrobitelných materiálů jsou řady vrtacích nástrojů WTX Speed a WTX Feed. Obě řady jsou v provedení pro vrtání do hloubky $5x D$ a větší.

Řada nástrojů s označením WTX Speed se vyznačuje zejména zakřiveným tvarem hlavního ostří a každý břit je opatřen dvěma vodícími fazetkami. Vrták je chráněn povlakem na bázi TiAlN o tloušťce vrstvy 3 až 4 μm . Teplotní odolnost použitého povlaku je do 1000 °C a koeficient tření vůči oceli bez použití procesní kapaliny (tzv. za sucha) dosahuje hodnoty 0,35. Tyto uvedené parametry umožňují vytváření otvorů převážně v běžných konstrukčních ocelích, litinách a korozivzdorných ocelích. [38]

Tabulka 13: Vrták WTX Speed od společnosti Ceratizit Group – geometrie, rozměry a doporučené řezné podmínky pro austenitickou korozi-vzdornou ocel [38]

SIG	DC	DCONMS	OAL	LCF	LU	LS	v_c	f
[°]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[m/min]	[mm/ot]
145	8	8	91	53	43	36	65	0,12



Obrázek 31: Vrták WTX Speed (řezná část) [39]

Řada nástrojů WTX Feed zaujme tříbřitou geometrií, která by měla umožnit podle výrobce použití vyšší řezné rychlosti a většího posuvu, a tím zvýšit produktivitu obráběcího procesu. Vrták je vybaven samostředícím příčným ostrím, které by mělo zvyšovat přesnost při najíždění do dané polohy. Dále je nástroj vybaven spirálovými kanálky pro přívod procesní kapaliny co nejbliže místu řezu. Povlak o tloušťce 4 až 5 μm je opět tvořen prvky TiAlN, jenž dosahuje teplotní odolnosti do 1000 °C. Podobně jako u nástroje WTX Speed je vrták WTX Feed doporučován pro konstrukční oceli, litiny a korozi-vzdorné oceli. [38]

Tabulka 14: Vrták WTX Feed od společnosti Ceratizit Group – geometrie, rozměry a doporučené řezné podmínky pro austenitickou korozi-vzdornou ocel [38]

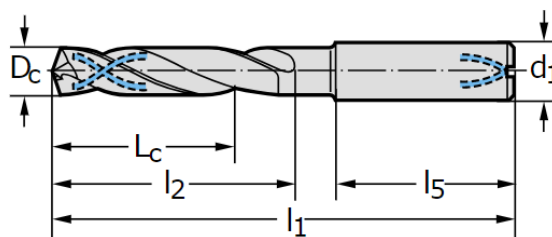
SIG	DC	DCONMS	OAL	LCF	LU	LS	v_c	f
[°]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[m/min]	[mm/ot]
140	8	8	91	53	43	36	60	0,16



Obrázek 32: Vrták WTX Feed (řezná část) [39]

5.7 Walter AG

Společnost Walter AG je německý výrobce nástrojů k obrábění a zároveň je dceřinou společností pod vedením Sandvik Holding GmbH. Vhodným nástrojem od společnosti Walter AG pro vrtání otvorů a děr do korozivzdorných ocelí by mohl být monolitní vrták ze slinutého karbidu s označení A3289DPL–8. Lze s ním vrtat i další tvrdé a těžkoobrobitelné materiály, jako jsou litiny, neželezné kovy, kalené oceli apod. Dvoubřítý vrták je opatřen vnitřními kanálky a je vyráběn standardně dle normy DIN 6537 K. Válcová stopka nástroje je zhotovena podle DIN 6535. Nástroj je chráněn dvojitým povlakem na bázi TiAlN (AlCrN) a tolerance řezného průměru nástroje je m7. [40]



Obrázek 33: Vrták A3289DPL–8 [40]

Tabulka 15: Vrták A3289DPL–8 od společnosti Walter AG – geometrie, rozměry a doporučené řezné podmínky pro austenitickou korozivzdornou ocel [40]

$2\alpha_r$	γ_f	D_c	d_1	l_1	l_2	L_c	l_5	v_c	f
[°]	[°]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[m/min]	[mm/ot]
140	30	8	8	79	41	29	36	45	0,13

Monolitní dvoubřítý vrták A3293TTP–8 patří do série nástrojů X-treme Inox, která se specializuje na obrábění korozivzdorných ocelí. Povlak nástroje na bázi TiAlN se nachází jen na řezné části tak, jak je znázorněno na obrázku níže. Základní rozměry a geometrie uváděné v předchozí tabulce pro vrták A3289DPL–8 jsou stejné. Liší se akorát doporučené řezné podmínky pro austenitickou korozivzdornou ocel ($v_c = 63$ m/min; $f = 0,13$ mm/ot). [40]

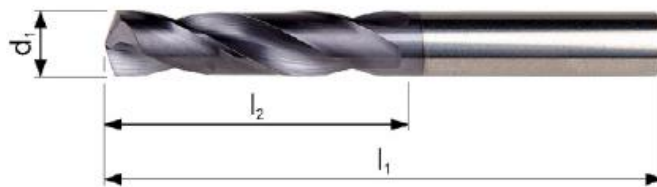


Obrázek 34: Vrták A3293TTP–8 [40]

5.8 Dormer Pramet

Společnost Dormer Pramet s.r.o. vznikla v roce 2014 sloučením výrobce monolitních nástrojů Dormer Tools a společnosti Pramet Tools, která se zaměřovala na výrobu nástrojů s vyměnitelnými břitovými destičkami ze slinutého karbidu. Do sortimentu společnosti patří nástroje pro soustružení, frézování, vrtání a závitování.

Vrtacím nástrojem podle uvedených specifikací obrábění od společnosti Dormer Pramet je R4578.0 Force–X s vnitřním chlazením. Jedná se o monolitní vrták ze slinutého karbidu, který lze použít při vrtání konstrukčních, legovaných a korozivzdorných ocelí, litin, titanu a jeho slitin, měděných a hliníkových slitin. Nástroj je vyráběn standardně dle normy DIN 6537 K s válcovou hladkou stopkou a rezná část je pokryta povlakem na bázi TiAlN. Výrobce dále uvádí, že šroubovitý tvar drážky je upraven pro lepší odvod třísek. [41]



Obrázek 35: Vrták R4578.0 [41]

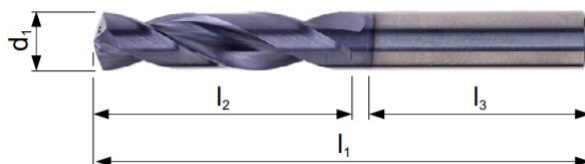
Tabulka 16: Vrták R4578.0 od společnosti Dormer Pramet – geometrie, rozměry a doporučené řezné podmínky pro austenitickou korozivzdornou ocel [41]

$2\kappa_r$	d_1	l_1	l_2	d_2	v_c	f
[°]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[m/min]	[mm/ot]
140	8 m7	79	41	8 h6	31,5 až 38,5	0,15 až 0,25

Vhodnějším nástrojem by mohl být vrták z řady Force M, jenž se specializuje na obrábění korozivzdorných ocelí. Vrtáky z mikrozrného slinutého karbidu jsou vybaveny upravenou geometrií se dvěma fazetkami na každém břitu, která zlepšuje samostředící funkci a kvalitu otvoru. Zvětšením úhlu příčného ostří bylo podle výrobce dosaženo zvýšení pevnosti nástroje a odolnosti proti opotřebení. Jádru nástroje je plynule ztenčeno za účelem snížení sil při vrtání a nástroj je povlakován vícevrstevným TiAlN. [42]



Obrázek 36: Řezná část vrtáku z řady Force M [42]



Obrázek 37: Vrták R4678.0 [42]

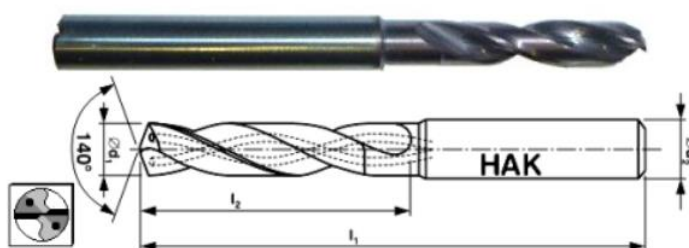
Tabulka 17: Vrták R4678.0 od společnosti Dormer Pramet – geometrie, rozměry a doporučené řezné podmínky pro austenitickou korozivzdornou ocel [42]

$2\chi_r$	d_1	l_1	l_2	l_3	d_2	v_c	f
[°]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[m/min]	[mm/ot]
140	8 m7	79	41	36	8 h6	67,5 až 82,5	0,12 až 0,2

5.9 Stimzet

Společnost M&V spol. s.r.o. se sídlem ve Vsetíně vyrábí pod značkou Stimzet celou řadu nástrojů pro zhotovení otvorů. Vrtací nástroje jsou zde vyráběny frézováním, tvářením za tepla a vybrušováním. Portfolio výrobků je zaměřeno převážně na vrtáky z rychlořezné oceli, ale v nabídce lze nalézt i nástroje ze slinutého karbidu.

Vrták s válcovou stopkou a s vnitřním chlazením je zhotoven ze slinutého karbidu K40UF, jehož vlastnosti jsou vhodné pro výrobu nástroje k obrábění austenitické korozivzdorné oceli. Podle výrobce lze dále s tímto vrtacím nástrojem obrábět konstrukční oceli, litiny a titanové, hliníkové a měděné slitiny. Broušení nástroje probíhá dle normy DIN 6537 a stopka dle DIN 6535 HAK. Řezná část vrtáku je chráněna povlakem na bázi TiAlN. [43]



Obrázek 38: Vrták F510800V700S značky Stimzet [43]

Tabulka 18: Vrták F510800V700S značky Stimzet – geometrie, rozměry a doporučené řezné podmínky pro austenitickou korozivzdornou ocel [43]

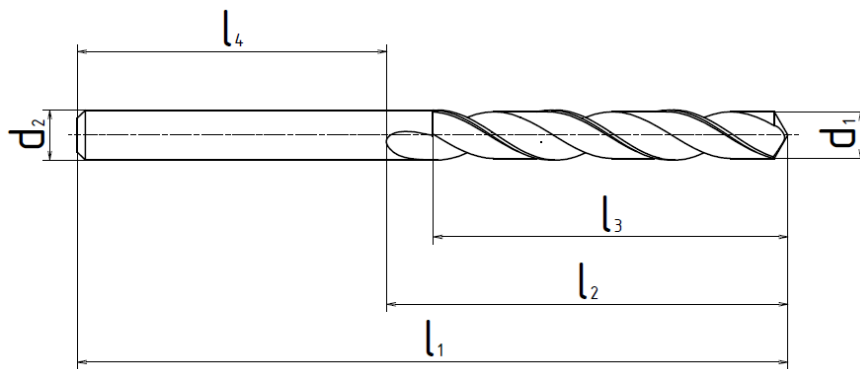
$2\chi_r$	γ_f	d_1	l_1	l_2	d_2	v_c	f
[°]	[°]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[m/min]	[mm/ot]
140	30	8 h6	78	35	8 h6	35 až 60	0,1 až 0,2

5.10 Shrnutí a zhodnocení

Podle stanovených specifikací v úvodu kapitoly byly vybrány vrtací nástroje napříč světovými a tuzemskými výrobci s uvedením jejich novinek a naznačením trendů v oblasti výroby šroubovitých vrtáků. Výrobci monolitních nástrojů je velké množství, proto byl výběr zaměřen spíše na evropské podniky, které běžně dodávají své nástroje i do České republiky. Informace o jednotlivých nástrojích byly nalezeny převážně v katalogích výrobců, kde jsou uvedeny pouze nejzákladnější údaje.

Základní rozměry standardních vrtáků jsou sjednoceny dle příslušných norem. Většina výrobců produkuje nástroje podle normy DIN 6537 a hladkou válcovou stopku podle DIN 6535. Zejména výrobci mimoevropští používají pro výrobu buď vlastní podnikové normy, nebo zcela jiné.

Pro přehlednost jsou v následující tabulce shrnuty údaje, které se týkají geometrie a rozměrů nástrojů. Základní rozměry monolitních vrtáků jsou sjednoceny podle normy DIN 6537 následovně: l_1 – celková délka vrtáku, l_2 – délka drážky, l_3 – doporučená hloubka vrtané díry nebo otvoru (činná délka), l_4 – délka stopky, d_1 – jmenovitý průměr vrtáku a d_2 je průměr stopky nástroje. Ekvivalenty těchto údajů s mezinárodní normou ISO 13399–1 jsou uvedeny v úvodu kapitoly.



Obrázek 39: Značení jednotlivých částí vrtáku podle normy DIN 6537 [44]

Průměrná hodnota z doporučených řezných rychlostí dvoubřitých vrtáků pro austenitickou korozivzdornou ocel napříč uvedenými výrobci nástrojů je přibližně 56 m/min a průměrná hodnota posuvu je 0,14 mm/ot. Rozmezí počítaných aritmetických průměrů je pro řezné rychlosti od 35 do 80 m/min a pro hodnoty posuvu od 0,09 do 0,2 mm/ot. Pro uvedené řezné podmínky je doporučeno použít procesní kapalinu.

Tabulka 19: Souhrn základních rozměrů a geometrie vybraných šroubových vrtáků

ČSN ISO 3002-1 / DIN 6537		$2\kappa_r$	γ_f	d_1	d_2	l_1	l_2	l_3
ISO 13399-1:2006		SIG	FHA	DC	DCON	OAL	LCF	LU
Výrobce	Označení	[°]	[°]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Sandvik Coromant	CoroDrill 860- MM	140	30	8 m7	8	79	41	25,3
Sandvik Coromant	CoroDrill 860 - GM	140	30*	8	8 h6	79	41	25,5
Gühring	RT 100 VA	140	< 30*	8 m7	8	79	41	29
Hoffmann Group	122380	135	30*	8	8 h7	79	41	29
Hoffmann Group	122435	145	< 30*	8	8	79	41	29
Mitsubishi Materials	MMS0800X3DB	140	30	8	8	91,5	41,5	25,5
Ceratizit Group	WPC VA	140	30*	8	8	79	41	29
Ceratizit Group	WTX Speed	145	30*	8	8	91	53	43
Ceratizit Group	WTX Feed	140	30*	8	8	91	53	43
Walter AG	A3289DPL	140	30	8	8	79	41	29
Dormer Pramet	R457	140	30*	8 m7	8 h6	79	41	-
Dormer Pramet	R467	140	30*	8 m7	8 h6	79	41	-
Stimzet	F510800V700S	140	30	8 h6	8 h6	78	35	-

Pozn.: - údaj nebyl nalezen, * nejedná se o oficiální údaj od výrobce (hodnota byla odečtena z fotografií)

5.10.1 Tvar a materiál nástroje

Standardně se vyrábějí dvoubřité vrtáky, ale pro speciální aplikace lze v nabídce nalézt i třibřité nástroje (Hoffmann Group 122435, Ceratizit Group WTX Feed) určené i pro korozivzdorné oceli. Vícebřité vrtáky mají obvykle větší počet vodičích fazetek na vedlejších hřbetech, proto je vrták v díře nebo otvoru lépe veden. Na druhou stranu při zvětšení počtu drážek se zvyšuje teplota řezání. Z toho důvodu se volí nejmenší možný počet řezných drážek. Třibřité vrtáky používají spíše pro dokončovací operace, kdy je vytvářen přesnější průměr díry a je snaha o díru s menší tolerancí válcovitosti. [6] Výrobce Ceratizit Group má ve své nabídce monolitní šroubovité vrták se čtyřmi břity WTX HFDS, který umožňuje použití vyššího posuvu, než je obvyklé. [45] Jeho možnosti

pro vrtání korozivzdorných ocelí jsou značně omezené, proto nebyl zařazen do výběru nástrojů.

Jako nástrojový materiál je nejčastěji uváděn slinutý karbid K10 až K40, jenž lze také použít pro obrábění celé řady těžkoobrobitelných materiálů včetně korozivzdorných ocelí. Vybrané nástroje jsou běžně chráněny povlakem na bázi TiAlN, případně je přidána další vrstva o jiném složení. Povlak TiAlN bývá vytlačován novými tenkými vrstvami, jejichž požadované vlastnosti jsou neustále vylepšovány. Vlastnosti povlaku na bázi TiAlN by stále mohly být uplatňovány u monolitních nástrojů z rychlořezné oceli. Pro monolitní vrtáky ze slinutého karbidu pro obrábění korozivzdorných ocelí a dalších těžkoobrobitelných materiálů doporučuje výrobce nástrojů Navel, spol. s.r.o. nanokompozitní povlaky na bázi CrAlSiN, AlCrBN nebo třívrstvou kombinaci povlaků TiN + AlTiN + CrAlSiN. [46]

5.10.2 Vliv úhlu sklonu šroubové drážky γ_f

U výše uvedených představitelů pro vrtání austenitických korozivzdorných ocelí je uveden shodný úhel sklonu šroubové drážky $\gamma_f = 30^\circ$, jehož velikost bývá spíše doporučována pro oceli o běžné pevnosti. Menší úhel sklonu šroubové drážky γ_f se může používat právě pro těžkoobrobitelné materiály, jelikož je lépe odváděna tříška z místa řezu a je zvýšena pevnost břitu.

Zmenšení velikosti úhlu čela γ_f (zvětšení úhlu řezu δ_f) se musí provést s ohledem na mechanismy plynoucí z teorie obrábění. Během zmenšení úhlu čela γ_f dochází ke zvýšení všech třech složek řezných sil. Bude se výrazně zvyšovat amplituda samobuzeného kmitání a vlivem zmenšení plochy řezání se může zvyšovat i teplota v místě řezu (při $\delta_o > 75^\circ$).

Snížení úhlu řezu je limitováno pevností břitu. Řešením může být vytvoření fazetky na prvním hlavním hřbetu, kdy při současném snížení úhlu řezu je zvýšena pevnost břitu s minimálním efektem na velikost složek řezných sil a samobuzeného kmitání. [5] Ze sledování vybraných nástrojů lze říci, že výrobci většinou aplikují fazetky na monolitní vrtáky.

Zmenšení úhlu sklonu šroubové drážky by mělo být provedeno zejména při usnadnění odvodu třísek a s ohledem na výše vyjmenované faktory. Společnost Sandvik Coromant u vrtáku CoroDrill 860 – GM nabízí i leštěný povrch drážek. Snížení drsnosti povrchu na čele a hřbetu nástroje vede zároveň ke snížení řezných sil vlivem snížení třecí

síly. Velká část výrobců má ve své nabídce nástroje pro všestranné použití, což může být důvod, proč není volen úhel sklonu drážky nižší. Volbou vhodného úhlu sklonu drážky γ_f u šroubových vrtáků jsme omezeni proměnlivou geometrií, kdy od špičky směrem k ose vrtáku se velikost úhlu γ_f zmenšuje.

5.10.3 Vliv úhlu hrotu $2\alpha_r$

V tabulce vybraných šroubových vrtáků pro korozivzdorné oceli se velikost úhlu hrotu $2\alpha_r$ pohybuje od 135° do 145° . U výrobců však zcela převažuje volba úhlu hrotu o velikosti 140° . Z teorie obrábění vyplývá, že relativně stabilní proces obrábění probíhá při úhlu nastavení $\alpha_r = 60^\circ$ a tato velikost je doporučována pro vrtáky určené pro oceli o běžné pevnosti. U monolitních vrtáků ze slinutého karbidu určených pro těžkoobrobitelné materiály je snaha o volbu úhlu nastavení α_r v rozmezí 60° až 75° .

U nástrojů s označením 122435 (Hoffmann Group) a WTX Speed (Ceratizit Group), které mají největší hodnotu úhlu nastavení ($\alpha_r = 72,5^\circ$) z vybraných monolitních vrtáků, lze očekávat rychlejší opotřebení na špičce než u ostatních uvedených vrtáků. Z důvodu menšího objemu nástrojového materiálu v okolí špičky se předpokládá, že teplo v okolí špičky nástroje bude pomaleji odváděno, proto by mohlo dojít k urychlení opotřebení nástroje. Vlivem velkého úhlu nastavení lze u těchto vrtáků očekávat menší účinek řezné síly F_c a pasivní síly F_p . Pasivní složka síly působí kolmo na osu vrtáku, proto má zásadní vliv na válcovitost vrtaných děr.

Analogicky lze u vrtáku 122380 (Hoffmann Group), který je vybroušen s menším úhlem nastavení, očekávat pomalejší opotřebení na špičce a zároveň však větší hodnoty řezné síly F_c a pasivní síly F_p . Dále by měl mít tento vrták větší tendenci ke vzniku samobuzeného kmitání, jelikož s klesajícím úhlem nastavení naopak roste amplituda kmitání, což souvisí s růstem pasivní síly.

6 Vybrané metody hodnocení vrtáků

Obráběcí nástroje se dají hodnotit podle různých kritérií souvisejících s obráběcím procesem, a to jsou:

- tvorba třísky,
- silové jevy,
- chvění,
- tepelné jevy,
- otupování břitů,
- obrobitelnost a řezivost.

V této kapitole jsou uvedeny vybrané metody hodnocení nástrojů se zaměřením na opotřebení monolitních vrtáků. Jsou popsány metody, které jsou v dnešní době díky rozvoji výkonné počítačové techniky snadno aplikovatelné a nenáročné na nároky měřících zařízení. Dále jsou charakterizovány i moderní možnosti hodnocení stavu opotřebovaných nástrojů.

6.1 Měření silového zatížení v závislosti na opotřebení

Stanovení silového zatížení působícího na nástroj je významné při konstruování obráběcích strojů, nástrojů a upínacích přípravků. Řezné síly se především hodnotí v závislosti na řezných podmínkách a mohou být jedním z kritérií pro určení vhodných řezných podmínek. Okamžitá velikost řezné síly se mění v čase, kdy osciluje okolo střední velikosti řezné síly, případně ostatních složek sil. Velikost kolísání těchto veličin lze označit jako ΔF s příslušným indexem. Při měření silových jevů jsou kladeny zvýšené nároky na měřící techniku a provedení experimentu. Přímé měření silových jevů se stanovuje pomocí deformace určitého členu soustavy stroj–nástroj–obrobek, jenž je vyvozena řeznou silou. [47]

Charakteristické formy opotřebení mohou být kvantifikovány pomocí měření velikosti kritérií VB, KT a dalšími, které jsou definovány v normě ISO 3685. Rozvoj opotřebení může být sledován přímo na stroji, kdy se během obráběcího procesu hodnotí silové zatížení nástroje (axiální složka řezné síly a krouticí moment). [48]

Měření velikosti složek řezné síly v závislosti na otupení patří mezi jednu z nepřímých metod měření. Opotřebení je kontinuálně stanoveno přímo na stroji, kdy silové zatížení nástroje roste v závislosti na otupení. Výzkumy stanovily, že existuje

přibližně lineární závislost mezi velikostí opotřebení na hřbetu VB a složkami řezných sil v logaritmických souřadnicích. Metodu lze použít pouze do určité velikosti VB, jelikož od této hodnoty začíná výrazný růst složek řezné síly. [47]

Analýza měření průběhu opotřebení má svá specifika, která tkví v následujících skutečnostech:

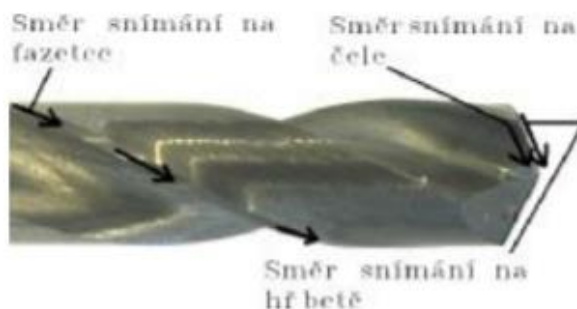
- vícebřité nástroje mohou mít odlišnou velikost opotřebení na jednotlivých břitech,
- rozvoj opotřebení nemá stejnou intenzitu na čele, hřbetu hlavním a vedlejším, případně na příčném ostří, což komplikuje měření,
- měření velikosti opotřebovaných ploch komplikuje odrazivost světla při použití obvyklých dílenských mikroskopů a možné zanesení částicemi obráběného materiálu,
- vznikající nárůstek spolu s ulpělými třískami zhoršují měření a při pokusu odstranění nárůstku může dojít k nechtěnému porušení ostří,
- obrábění je nutno zastavovat za účelem měření, což je nežádoucí z pohledu prodlužování doby experimentu. [48]

Metodika hodnocení řezných vlastností nástrojů s definovanou geometrií využívá [49] analýzu sil při obrábění, jež mají vysokou vypovídající schopnost o obráběném materiálu, technologii, geometrii nástroje a stavu opotřebení břitu. Dnešní výpočetní technika umožňuje digitalizaci, numerické zpracování a další využití naměřených dat. Naměřené trojice sil v kartézském systému a jejich výslednice se dále transformuje do ortogonálního systému a do dalších významných směrů. Pomocí dané metodiky se vyhodnocují průběhy jednotlivých složek řezných sil a jejich podíl na výslednici sil. Zřetelné výstupky v pásmu vysokých řezných sil může být pravděpodobnou příčinou vylomení části břitu.

Ze změn složek silového zatížení je možné sledovat změny geometrie nástroje, ale i rozvoj opotřebení na hřbetu a na čele nástroje. Měření opotřebení tímto způsobem umožňuje stanovit přehled o rozvoji jednotlivých forem opotřebení bez nutnosti přerušování testování za účelem měření sledovaných kritérií. Uvedená metoda je v porovnání s klasickým přístupem měření opotřebení nástrojů časově méně náročná. [50]

6.2 Měření drsnosti vrtáků

V práci [51] byla měřena drsnost na hlavním hřbetu, čele a fazetce šroubových vrtáků. Měřené hodnoty pomohly ke zmapování opotřebení nástrojů při vrtání oceli 30CrMoV9 (ČSN 15 241). Pro porovnání byl zvolen jeden povlakovaný vrták s tenkou vrstvou TiN, zatímco druhý vrták povlakován nebyl. Oba vrtáky byly ze slinutého karbidu K20. Před začátkem testování byly změřeny počáteční hodnoty drsnosti povrchu nástrojů, které byly porovnány s hodnotami drsnosti po ukončení zkoušek. Testování bylo ukončeno při porušení řezné části, jenž nastalo u obou zkoumaných vrtáků. Hodnoty drsnosti byly měřeny v předem určených vzdálenostech a směrech. Ze tří naměřených hodnot drsnosti na každé ploše vrtáku byla stanovena střední aritmetická hodnota se směrodatnou odchylkou.



Obrázek 40: Směry snímání drsnosti povrchu [51]

Zkoušky byly prováděny bez procesní kapaliny, tudíž docházelo ke značnému teplotnímu namáhání nástrojů. Vlivem zvýšené teploty vrtáku bylo iniciováno otupení břitu a změna geometrie nástrojů. Nárůst teploty byl sledován změnou barvy povlaku TiN a vedl k vyštípnutí části břitu. Při porovnání povlakovaného a nepovlakovaného vrtáku lze sledovat nárůst produktivity odvrtné délky o přibližně 260 % ve prospěch povlakovaného nástroje. Hodnoty průměrné aritmetické úchyly povrchu R_a prokázaly, že drsnost povrchu vrtáku před depozicí se liší v řádu setin mikrometrů od drsnosti povrchu nástroje povlakovaného. Po vyhodnocení byl potvrzen předpoklad, že čím nižší je drsnost na čele a hřbetu, tím dochází k menší intenzitě opotřebení.

6.3 Měření opotřebení dle vibrací, zvuku, akustické emise

Měření opotřebení dle vibrací, zvuku a akustické emise se řadí k nepřímým metodám. Měření vibrací je široce využíváno při monitorování rotačních strojů, ale není běžně využíváno při hodnocení opotřebení obráběcích nástrojů. Měření vibrací je

založeno na korelaci mezi vibracemi obráběcího stroje a opotřebením nástroje. Významnou metodou měření vibrací je měření pomocí akcelerometru, kdy piezoelektrické součásti snímají vibrace a intenzitu samobuzeného kmitání, které jsou ve většině případů nežádoucím jevem při obrábění. Výhodou této metody je jednoduchá instalace měřicí techniky. Mezi nevýhody patří závislost na obráběném materiálu a jeho struktuře a změně řezných podmínek. Měření opotřebením prostřednictvím vibrací je ovlivněno okolním prostředím, proto měření obvykle probíhá pouze v laboratořích. [52]

Měření zvuku je prováděno pomocí akcelerometru, jenž je umístěn v blízkosti držáku. Snímají se zvukové vibrace od tření na hřbetu nástroje. Ukazatelem opotřebením nástroje je poměr mezi nízkými a vysokými frekvencemi. Další metodou měření zvuku může být pomocí mikrofону, kdy se s nárůstem opotřebením začíná objevovat nárůst amplitud některých frekvencí. [52]

Mezi moderní možnosti hodnocení stavu opotřebených nástrojů patří studie, která se zabývá monitorováním a záznamem akustického tlaku v průběhu frézování pomocí mikrofону. Pomocí analýzy záznamu zvukového spektra byla vytvořena tzv. 3D mapa akustického tlaku. V práci byla potvrzena souvislost mezi frekvencí zvuku a dynamickou stabilitou procesu obrábění. Měření akustického tlaku lze teoreticky sledovat aktuální stav procesu obrábění a nepřímo hodnotit stav opotřebením nástroje. [50]

Během měření akustické emise jsou zaznamenávány a vyhodnocovány ultrazvukové povrchové napěťové vlny, které vznikají při tvorbě třísky. Výhodou této metody je eliminace vlivu prostředí a vlastních kmitů stroje, které leží v nižším pásmu zvukového spektra než ultrazvukové vlny. Během soustružení oceli E295 byl zjištěn nárůst akustické emise v závislosti na opotřebením nástroje. U oceli X5CrNi18–10 nebyl podobný nárůst akustické emise zaznamenán. Měření pomocí akustické emise je citlivé na změny při obráběcím procesu, proto je rozvoj této metody v širším průmyslovém použití při sledování stavu opotřebením nástroje omezen. Dalším nedostatkem může být nedostatečné prozkoumání dané metody a neuspokojivé vysvětlení probíhajících dějů v obráběcím procesu. [52] [53]

7 Experiment

V rámci praktické části byla navázána spolupráce se společností NAVEL, spol. s.r.o., která se zabývá výrobou a ostřením zejména monolitních nástrojů ze slinutého karbidu. Společnost NAVEL, spol. s.r.o. by ráda rozšířila svoji katalogovou nabídku o monolitní vrtáky, které budou určeny pro těžkoobrobitelné korozivzdorné oceli. Proto společnost NAVEL, spol. s.r.o. navrhla novou geometrii a tvar vrtáku, který byl podle různých kritérií hodnocen a porovnáván s vybranými představiteli. Posuzované vrtáky od dalších výrobců obráběcích nástrojů byly vybrány na základě přehledu uvedeného v kapitole 5 Monolitní vrtáky pro korozivzdorné oceli. První část experimentu se věnovala zkoumání silového účinku složek řezných sil pro vybrané monolitní vrtáky bez použití procesní kapaliny. Druhá část se zabývala sledováním rozvoje opotřebení nástrojů. Obě zkoušky byly uskutečněny v halových laboratořích Fakulty strojní ČVUT v Praze.

7.1 Popis použitého vybavení

7.1.1 Obráběný materiál

Během experimentu byla použita austenitická korozivzdorná ocel X5CrNi18–10 (DIN 1.4301, AISI 304, ČSN 17 240) jako materiál obrobku. Vyznačuje se dobrou odolností proti korozi ve vzdušné prostředí i ve vodě a odolností vůči pracovním teplotám přibližně do 350 °C. Chromniklová ocel X5CrNi18–10 hůře odolává v ovzduší s koncentrací chloridů, anorganických kyselin a solí a dále není vhodná při kontaktu s vysoce koncentrovanými kyselinami. Z tohoto důvodu není široce uplatňována v chemickém průmyslu, ale obvykle se používá zejména v potravinářském, farmaceutickém nebo stavebním průmyslu. [54]

Tabulka 20: Chemické složení oceli X5CrNi18–10 (1.4301) v hm. % podle normy ČSN EN 10088–1 [55]

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	N [%]
0,07	1	2	0,045	0,015	17,5 až 19,5	8 až 10,5	0,1

Austenitická korozivzdorná ocel X5CrNi18–10 je vhodná k hlubokému tažení a je paramagnetická. Dosahuje vysokých hodnot vrubové houževnatosti i při nízkých teplotách, jelikož ocel nevykazuje tzv. tranzitní chování. Vysoká tažnost a houževnatost je dána vyšším obsahem niklu, který se uplatňuje například při výrobě cisteren na převoz

mléka, sudů na pivo, pro výrobu kuchyňských dřezů a dalšího kuchyňského vybavení. [56] [57]

Austenitické korozivzdorné oceli jsou velmi dobře svařitelné při dodržení přesných zásad, které snižují zejména možnost vzniku trhlin za tepla. Mají nižší koeficient tepelné vodivosti a přibližně o 50 % vyšší koeficient tepelné roztažnosti než uhlíkové oceli. [57] Austenitické korozivzdorné oceli mohou vykazovat náchylnost k mezikrystalové korozi, která se zpravidla eliminuje rozpouštěcím žiháním. Podobně jako u ostatních austenitických korozivzdorných ocelí je X5CrNi18–10 špatně obrobitelná a během řezného procesu může docházet k jejímu zpevňování.

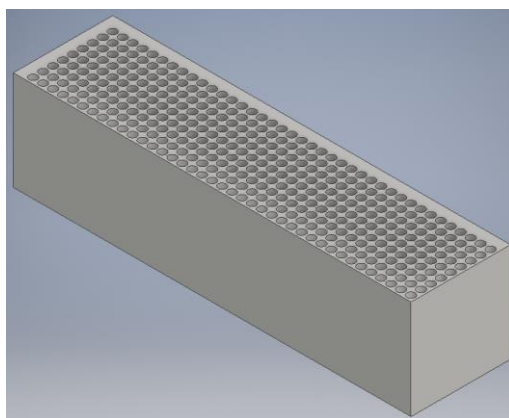
Tabulka 21: Mechanické vlastnosti oceli X5CrNi18–10 (1.4301) podle normy ČSN EN 10088–2 [58]

R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	KV [J]	
			příčně	podélně
520 až 720	210	45	60	100

Tabulka 22: Fyzikální vlastnosti oceli X5CrNi18–10 (1.4301) podle normy ČSN EN 10088–2 [58]

Měrná hmotnost	Modul pružnosti	Součinitel tepelné roztažnosti	Tepelná vodivost	Střední měrné teplo	Měrný elektrický odpor
[kg·dm ⁻³]	[GPa]	[K ⁻¹]	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	[Ω·mm ² ·m ⁻¹]
7,9	200	16 · 10 ⁻⁶	15	500	0,73

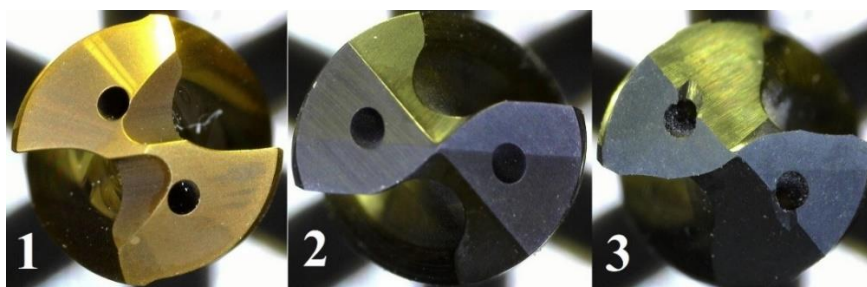
Před provedením vrtacích zkoušek byl obráběný materiál frézován do tvaru kvádru o přibližných rozměrech (400x100x100) mm, do kterého byly vrtány otvory o průměru 8 mm a hloubce 20 mm a 25 mm. Schéma vrtání je uvedeno v příloženém modelu s rozestupy 2 mm pro jednotlivé otvory. Po provedení a vyhodnocení vrtacích zkoušek byl obrobek znovu frézován, aby byl připraven na pokračování experimentu.



Obrázek 41: Rozložení vrtaných otvorů na obráběném materiálu

7.1.2 Obráběcí nástroje a řezné podmínky

Všechny zkoumané monolitní vrtáky ze slinutého karbidu jsou určeny pro obrábění austenitických korozivzdorných ocelí do hloubky $3xD$. Tyto nástroje byly mezi sebou porovnávány a hodnoceny za účelem ověření nového vrtáku od společnosti NAVEL, spol. s.r.o. Pro experiment byly dále vybrány vrtáky od společností Dormer Pramet (řada Force M) a Sandvik Coromant (řada CoroDrill 860 – GM), jejichž detailní specifikace jsou uvedeny v kapitole 5 Monolitní vrtáky pro korozivzdorné oceli. Od každého výrobce byly dodány 2 kusy totožných nástrojů a průměr řezné části a stopky je shodně 8 mm.



Obrázek 42: Stav vrtáků před experimentem

Před provedením obou zkoušek byly změřeny vybrané parametry geometrie břitu. Měření geometrie bylo provedeno pomocí dotykové sondy s řídicím programem MIKROPROG a rozměry břitu byly vyhodnoceny pomocí programu DinoCapture 2.0. Číslování nástrojů bylo stanoveno náhodně a v práci se dále budou uvádět pouze čísla nástrojů kvůli zjednodušení značení.

Tabulka 23: Naměřená geometrie a povlaky zkoumaných vrtáků

Číslo nástroje a barva	Výrobce	Označení	$2\kappa_r$ [°]	γ_f [°]	α_{o1} [°]	α_{o2} [°]	Délka příčného ostří [mm]	Úhel příčného ostří [°]
1 •	Sandvik Coromant	860.1–0800–025A1–GM X1BM	141	30,8	10,1	-	0,21	64
2 •	Dormer Pramet	R4678.0	152	30,4	10,7	24	0,22	62
3 •	Navel	-	142	29,9	12,5	25	0,24	60

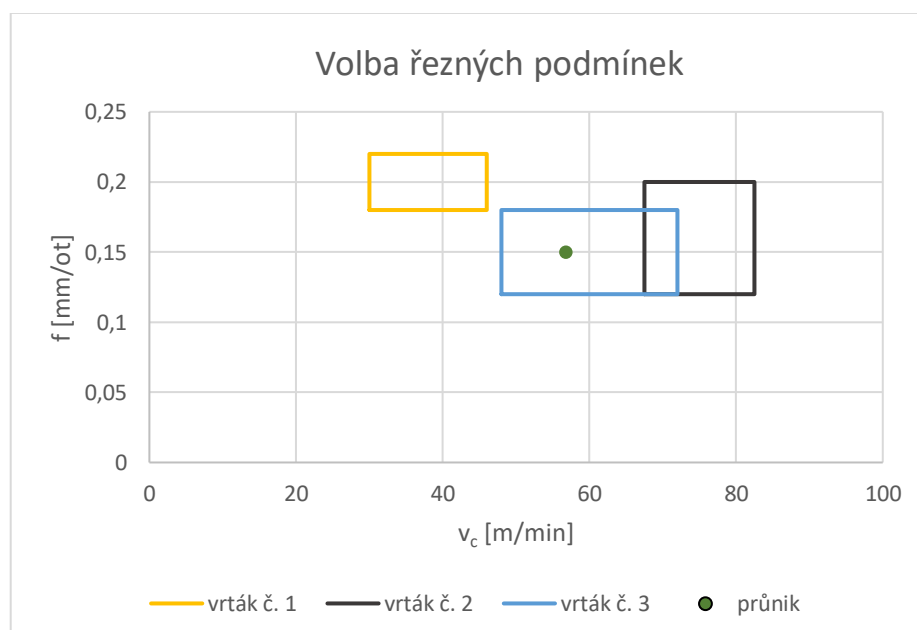


Obrázek 43: Měření úhlu hrotu $2\kappa_r$

Mezi zkoumanými vrtáky nebyly patrné zásadní rozdíly v geometrii nebo v použitých povlacích, které jsou všechny na bázi titanu a patří k běžně aplikovaným typům. Geometrii se zejména odlišuje vrták č. 1, který má šroubovitý výbrus hlavního hřbetu, a proto se na nástroji nemusí brousit druhý (α_{02}), případně třetí hlavní hřbet. Z důvodu univerzálního použití i do jiných těžkoobrobitelných materiálů je tento nástroj opatřen větším poloměrem ostří ρ než u ostatních posuzovaných nástrojů, které jsou doporučovány výhradně do korozivzdorných ocelí. Při obrábění korozivzdorných ocelí je pro nástroj č. 1 doporučována nižší řezná rychlost a vyšší posuv než u zbylých vrtáků. Dále je pro vrták č. 1 charakteristický tvar výbrusu, který se podobá tvaru A podle DIN 1412 a vytváří se za účelem zkrácení příčného ostří a zlepšení samostředění.

U ostatních vrtáků je příčné ostří zkráceno pomocí třetího hlavního hřbetu. Při detailním přiblížení bylo pozorováno kvalitnější zpracování ploch hlavních hřbetů u vrtáků č. 1 a 2, což může být dáno použitím vhodnějšího druhu slinutého karbidu. Informace o aplikovaném druhu slinutého karbidu nebyly u těchto nástrojů zjištěny. Pro nástroj č. 3 byl použit slinutý karbid CTS20D od výrobce Ceratizit Group odpovídající označení K20 až K40.

Oblasti doporučených řezných podmínek zkoumaných nástrojů jsou graficky znázorněny níže. Volba řezných podmínek vychází z doporučených hodnot od jednotlivých výrobců pro vrtání austenitické korozivzdorné oceli s procesní kapalinou. Pro možnost porovnání vybraných nástrojů byl stanoven vhodný průnik řezné rychlosti a posuvu, jejichž hodnoty jsou pro obě zkoušky stejné a jsou uvedeny vždy u příslušného experimentu.



7.1.3 Obráběcí stroje

První část experimentu, při které bylo měřeno silové zatížení nástrojů, probíhala na CNC frézce VMC 500, jejíž specifikace jsou uvedeny v příslušné tabulce. Nástroje byly upnuty pomocí kleštinového upínače s kuželovou stopkou.

Tabulka 24: Základní parametry CNC frézky VMC 500 [59]

Max. výkon	Max. nosnost stolu	Max. otáčky nástroje	Nástrojových míst
3,7 kW	350 kg	6000 ot·min ⁻¹	21



Obrázek 44: CNC frézka VMC 500

Druhá část experimentu se uskutečnila na svislém pětiosém frézovacím centru Okuma MU-400 V II, při kterém byl zkoumán průběh opotřebení břitů. Vybrané vrtáky byly upnuty opět přes kleštinový upínač. CNC frézka umožňuje přívod procesní kapaliny skrz chladicí kanálky nástroje.

Tabulka 25: Základní parametry 5-ti osé CNC frézky Okuma MU-400 II

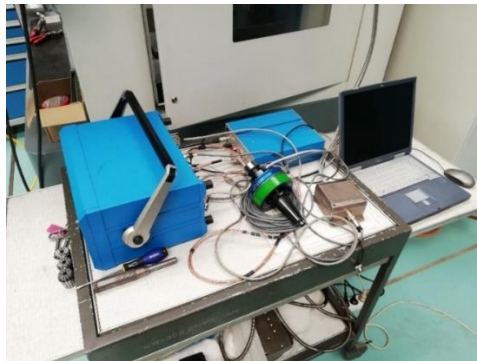
Max. výkon	Průměr prac. stolu	Max. otáčky nástroje	Nástrojových míst
11 kW	400 mm	8000 ot·min ⁻¹	20



Obrázek 45: Svislá 5-ti osá CNC frézka Okuma MU-400 II

7.1.4 Další zařízení

Rotační dynamometr KISTLER typ 9123C byl použit k měření silového zatížení nástrojů. Měření silového zatížení probíhalo v kartézském souřadném systému stroje, kdy rotační dynamometr KISTLER 9123C snímal reakce při procesu vrtání u jednotlivých nástrojů. Pomocí použitého zařízení bylo možné získat velikost silového zatížení v osách X, Y, Z a krouticího momentu. Na obrázku níže je možné vidět sestavení měřící techniky pro měření silového zatížení, jež bylo zapojeno do CNC frézky VMC 500.



Obrázek 46: Rotační dynamometr Kistler typ 9123C a zapojení do CNC frézky VMC 500

Opotřebení nástrojů bylo snímáno pomocí kamery a držáku, do kterého bylo možné umístit nástroj i s upínačem. Z toho důvodu nebylo nutné nástroje pro jednotlivé měření opotřebení vyndávat z kleštinových upínačů. Kamera byla připojena USB kabelem k notebooku a pomocí programu DinoCapture 2.0 byly snímány nástroje v kolmé poloze na první hlavní hřbet, na kterém bylo možné sledovat průběh opotřebení na hřbetu VB. Před každým měřením vzdáleností muselo být v DinoCapture 2.0 nastaveno odpovídající zvětšení.



Obrázek 47: Kamera a držák s kleštinovým upínačem v poloze pro měření opotřebení na hřbetu

7.2 Testování silového zatížení vybraných nástrojů

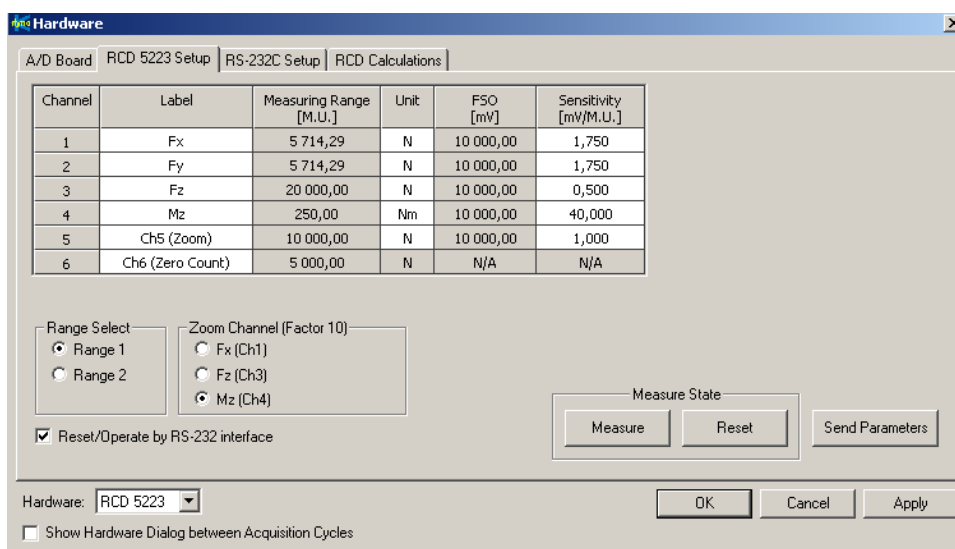
Vybrané monolitní vrtáky byly porovnány podle silových účinků při vrtání neprůchozích otvorů o hloubce 20 mm. Z důvodu použití CNC frézky VMC 500 a rotačního dynamometru KISTLER 9123C byla zkouška provedena bez přítomnosti procesní kapaliny. K potřebě porovnání jednotlivých vrtáků byly zvoleny shodné řezné podmínky pro všechny zkoumané nástroje, jejichž hodnoty jsou uvedeny v tabulce níže. Řezné podmínky vycházejí z doporučených hodnot výrobců nástrojů při vrtání s procesní kapalinou, která v této zkoušce nebyla použita.

Tabulka 26: Stanovení řezných podmínek pro testování silového zatížení

Veličina	Označení	Hodnota	Jednotka
Řezná rychlost	v_c	56,75	$m \cdot min^{-1}$
Otáčky	n	2258	min^{-1}
Posuv	f	0,15	$mm \cdot ot^{-1}$
Posuvová rychlost	v_f	339	$mm \cdot min^{-1}$
Hloubka řezu	a_p	4	mm
Druh vrtání	Vrtání do plna		
Procesní kapalina	NE		

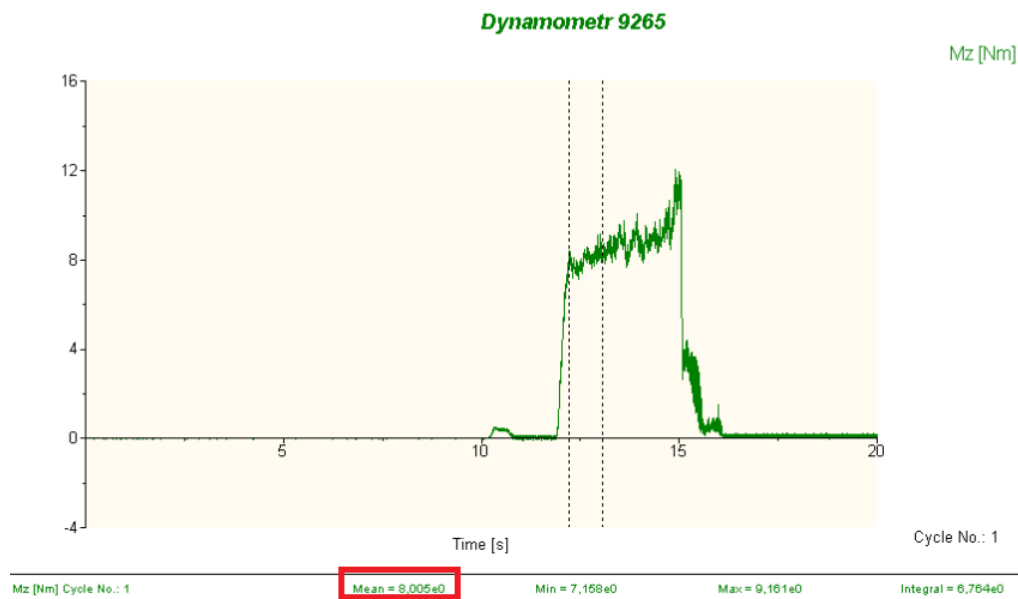
7.2.1 Postup a vyhodnocení silového zatížení

Naměřené hodnoty silového zatížení vrtáků byly zaznamenány pomocí programu DynoWare. Následně byla hodnocena složka síly v ose vřetena stroje, která odpovídá síle posuvu F_f (F_z), a krouticí moment M_c (M_z). Před samotným měřením byl nastaven záznam hodnot silového zatížení nástrojů v programu DynoWare následovně.

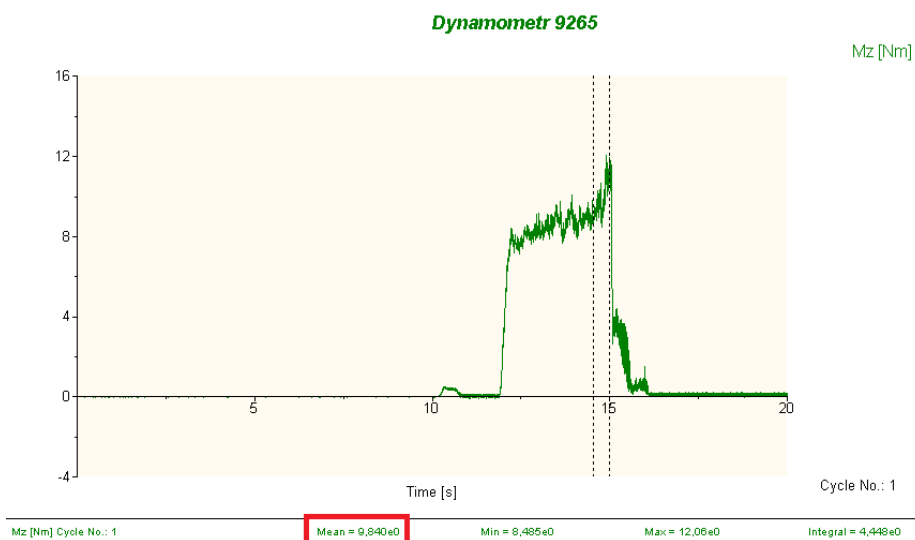


Obrázek 48: Nastavení záznamu hodnot v programu DynoWare

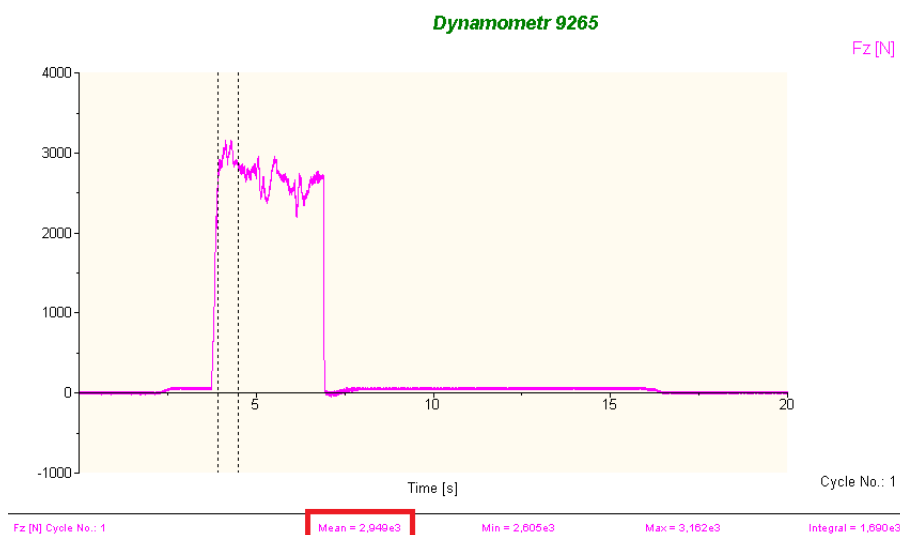
Hodnocení složek sil probíhalo rovněž v programu DynoWare, kdy byly stanoveny střední hodnoty po značném nárůstu (dolní index 0) a před značným poklesem (dolní index 1) sledované složky (na začátku a na konci procesu vrtání). Z počátečních a koncových středních hodnot byla vypočítána výsledná síla posuvu F_f a krouticího momentu M_c aritmetickým průměrem z obou příslušných hodnot. Postup hodnocení silového zatížení je pro lepší pochopení uveden na snímcích z programu DynoWare, kde byl hodnocen krouticí moment a síla posuvu pro vrták č. 3, a byly zde vyznačeny odečtené hodnoty. Všechny naměřené hodnoty jsou uvedeny v Příloze č. 1.



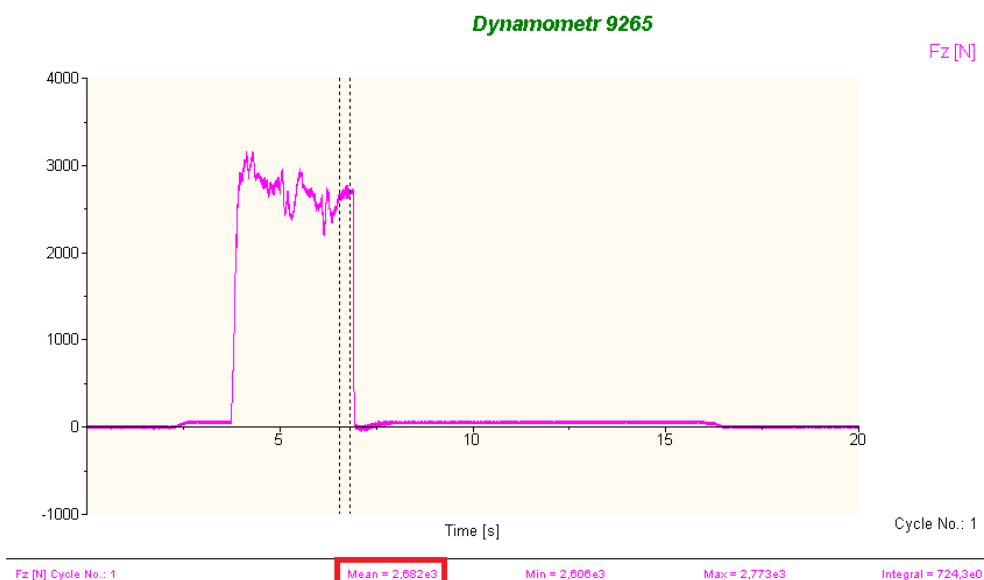
Obrázek 49: Vyhodnocení krouticího momentu s vyznačenou hodnotou M_{c0} pro vrták č. 3



Obrázek 50: Vyhodnocení krouticího momentu s vyznačenou hodnotou M_{c1} pro vrták č. 3



Obrázek 51: Vyhodnocení síly posuvu s vyznačenou hodnotou pro F_{f0} pro vrták č. 3



Obrázek 52: Vyhodnocení síly posuvu s vyznačenou hodnotou F_{f1} pro vrták č. 3

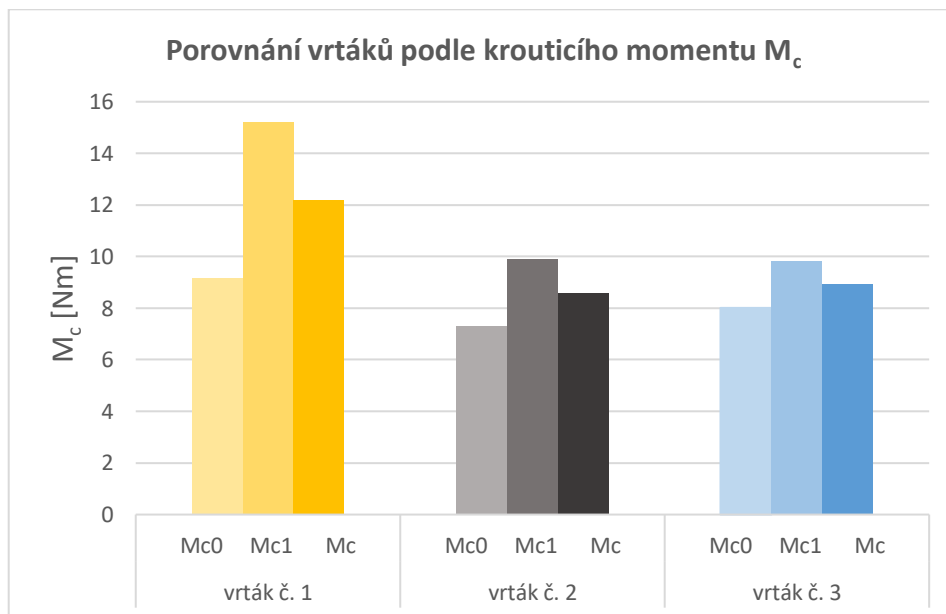
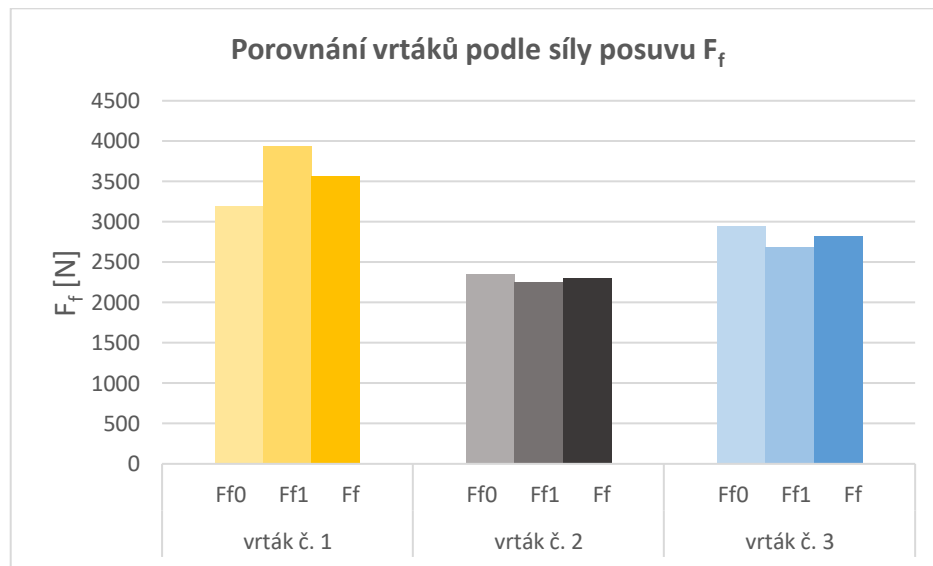
Tabulka 27: Vyhodnocené hodnoty silového zatížení nástrojů

Číslo nástroje	F_{f0} [N]	F_{f1} [N]	F_f [N]	M_{c0} [Nm]	M_{c1} [Nm]	M_c [Nm]
1	3193	3935	3564	9,16	15,21	12,18
2	2344	2245	2294,5	7,31	9,89	8,60
3	2949	2682	2815,5	8,01	9,84	8,93

Nárůst mezi počátečními a koncovými hodnotami krouticího momentu byl dán zejména rostoucí hloubkou vrtání. U nástroje č. 1 nebyly naměřeny kompletní hodnoty. Koncový úsek měření vrtáku č. 1 byl stanoven do doby, kdy došlo ke zničení nástroje. Maximální hodnoty, při kterých nastala totální destrukce nástroje č. 1 jsou:

$F_{f_max} = 5321 \text{ N}$, $M_{c_max} = 28,82 \text{ Nm}$. Při vrtání prvního otvoru došlo u nástrojů č. 2, 3 ke křehkému porušení na jednom břitu, které znemožňuje další použití vrtáků.

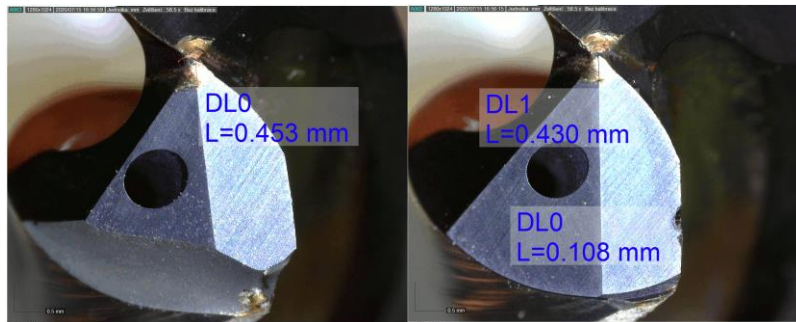
Pro vrták č. 2 nebyla podle předpokladů naměřena největší posuvová síla, jelikož má největší úhel hrotu $2\alpha_r$. Avšak pro vrták č. 2 byly naměřeny nejnižší hodnoty posuvové síly i kroučícího momentu. Testování silového zatížení bylo silně ovlivněno charakterem zkoušek, a proto bylo vyhodnocení zaměřeno na opotřebení nástrojů a popis třísek při vrtání za sucha.



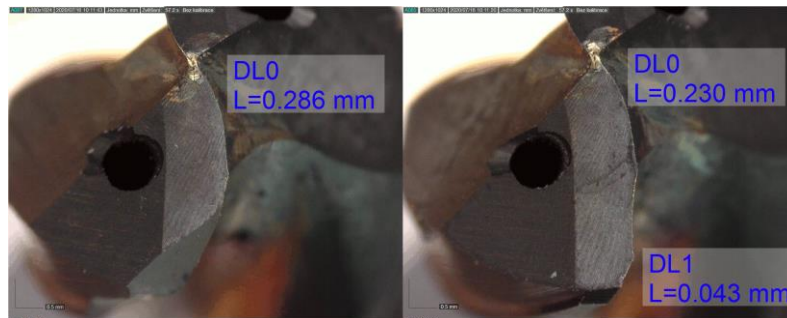
Během popsané zkoušky bylo monitorováno opotřebení nástrojů. Na přiložených obrázcích lze sledovat lom na břitech pro vrtáky č. 2 a 3, které mají velmi podobné znaky. Při hledání příčiny, proč vznikají tyto lomy, bylo provedeno vrtání za sucha dalším monolitním nástrojem do korozivzdorných ocelí od výrobce TKZ Polná, spol. s.r.o (vrták

č. 4). Tento vrták vykazuje totožné znaky, kdy došlo rovněž k vylomení na špičce jednoho břitu.

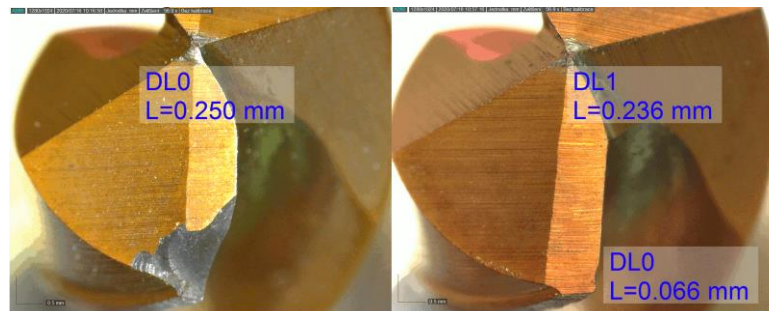
Pro srovnání nástrojů jsou uvedeny orientační hodnoty opotřebení na hřbetu pro oba břity. Jedna hodnota ukazuje opotřebení v okolí příčného ostří, kdy byla změřena vzdálenost od osy vrtáku směrem ke špičce do bodu, kde se již opotřebení nevyskytovalo. Další zkoumanou hodnotou je opotřebení na hřbetu VB, kdy došlo k částečnému vylomení ostří u všech nástrojů na druhém (celistvém) břitu. Pro doplnění byly zachyceny i úlomky zničeného vrtáku č. 1.



Obrázek 53: Oba břity vrtáku č. 2 po měření silového zatížení



Obrázek 54: Oba břity nástroje č. 3 po měření silového zatížení



Obrázek 55: Oba břity vrtáku od TKZ Polná, spol. s.r.o.(vrták č. 4) po měření silového zatížení



Obrázek 56: Destrukce vrtáku č. 1 po měření silového zatížení

Tvar třísek z testování silového zatížení bez procesní kapaliny byl u všech zkoumaných nástrojů velmi podobný a jednalo se o smotané stužkové třísky. U vrtáku č. 2 se vytvářely spíše smotané vinuté třísky. Na všech třískách byly viditelné znaky přílišného tepelného zatížení a potvrdila se obecná doporučení ohledně obrábění korozivzdorných ocelí.



Obrázek 57: Tvary třísek po zkoušce silového zatížení pro jednotlivé nástroje

Doporučení ohledně použití procesní kapaliny při vrtání austenitických korozivzdorných ocelí jsou zcela oprávněná, jelikož docházelo ke značnému tepelnému namáhání nástrojů. Ke kritickému opotřebení nástrojů došlo až po vytvoření otvoru, kdy se vlnité dlouhé třísky nalepily na břit a při okamžitém výjezdu nástroje z otvoru došlo ke zmíněným lomům u všech zkoumaných nástrojů. Při opakování zkoušky by bylo vhodné změnit vrtací cyklus, kdy by se vrták protočil ve vytvořeném otvoru, a tím by zřejmě došlo i k odstranění dlouhé třísky z břitu bez porušení. Při suchém vrtání by dále bylo prospěšné snížit řeznou rychlost, případně posuv, a tím se by dosáhlo dalšího poklesu teploty v místě řezu. Při nutnosti zachování řezných podmínek by bylo vhodné zajistit přívod procesní kapaliny alespoň boční záplavou.

7.3 Testování opotřebení břitu

Obrobek byl upnut pomocí upínek na pracovní stůl pětiosého frézovacího centra Okuma MU-400 V II a postupně byly vrtány otvory v pravidelných rozstupech 2 mm. Po určitém počtu vyvrtaných otvorů o hloubce 20 mm a 25 mm byl nástroj vyjmut z CNC frézky a bylo zkoumáno jeho opotřebení na hlavním hřbetu. Při vytvoření určitého počtu otvorů byl nástroj vyměněn a po vyvrtání otvorů v jedné vrstvě byl obrobek čelně frézován o výšku, která se rovnala hloubce děr. Opotřebení nástrojů bylo snímáno pomocí programu DinoCapture 2.0, ve kterém probíhal i odečet dat.



Obrázek 58: Upnutí obrobku na pracovní stůl stroje Okuma MU-400 V II

Záznam nárůstu opotřebení břitu VB po určitém počtu vyvrtaných otvorů probíhal u všech nástrojů za stejných řezných podmínek. Řezné podmínky byly vybrány průnikem doporučených hodnot pro vrtání austenitické korozivzdorné oceli při použití procesní kapaliny. Řezné podmínky jsou stejné jako při testování silového zatížení nástrojů s tím rozdílem, že při této zkoušce byla použita procesní kapalina v podobě emulze, která byla přiváděna chladicími kanálky nástroje. Limitní šířka opotřebení na hřbetu VB_L byla zvolena na základě zkušeností. Při dosažení uvedené kritické hodnoty opotřebení břitu bude vyčerpána trvanlivost břitu a zkouška bude pro daný nástroj ukončena.

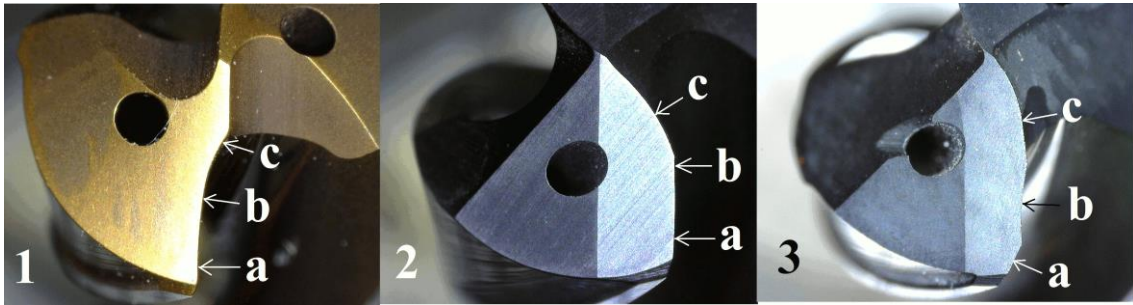
Tabulka 28: Stanovení řezných podmínek pro testování opotřebení břitu

Veličina	Označení	Hodnota	Jednotka
Řezná rychlost	v_c	56,75	$m \cdot min^{-1}$
Otáčky	n	2258	min^{-1}
Posuv	f	0,15	$mm \cdot ot^{-1}$
Posuvová rychlost	v_f	339	$mm \cdot min^{-1}$
Hloubka řezu	a_p	4	mm
Limitní opotřebení	VB_L	0,1	mm
Druh vrtání	Vrtání do plna		
Procesní kapalina	Emulze (vnitřní přívod)		

Hlavním cílem testování bylo zhodnocení opotřebení břitu sledovaných nástrojů. Použitím obráběcího stroje Okuma MU-400 II byl umožněn také sběr dat zabývajících se silovým zatížením jednotlivých vrtáků v celém průběhu opotřebovacích zkoušek. Z toho důvodu bylo pro přehlednost testování rozděleno na dvě části.

7.3.1 Postup měření opotřebení břitu

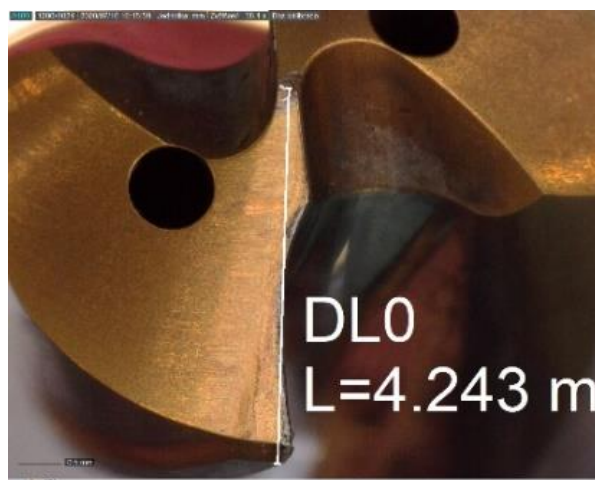
Opotřebení hřbetu VB bylo sledováno zvlášť pro každý břit vrtáku. Na ostří byly vybrány 3 body a v jejich nejbližším okolí byl proveden odečet opotřebení na hřbetu. Tato místa byla vybrána s ohledem na odečet střední hodnoty opotřebení a aby se zamezilo odečítání hodnot VB na špičce vrtáku, kde dochází vždy k velmi rychlému nárůstu opotřebení. Pro jednotlivé vrtáky byla místa odečtu hodnot opotřebení VB stanovena podle obrázků níže.



Obrázek 59: Části ostří pro odečet hodnot opotřebení VB

Před začátkem měření opotřebení musela být pro každý upnutý nástroj stanovena hodnota zvětšení snímku. Ze znalosti úhlu hrotu $2\kappa_r$ pro příslušný vrták o daném průměru byla vypočtena vzdálenost x mezi body, kdy jeden bod je určen průnikem osy nástroje a příčného ostří a druhý bod je špička nástroje. Pro vrták č. 1 byl proveden následující výpočet úsečky x , která byla určující pro nastavení správného zvětšení v programu DinoCapture 2.0.

$$x = \frac{\frac{D}{2}}{\cos(90^\circ - \kappa_r)} = \frac{\frac{8}{2}}{\cos(90^\circ - 70,5^\circ)} = 4,243 \text{ mm} \quad (7.1)$$



Obrázek 60: Nastavené zvětšení v programu DinoCapture 2.0

První vrstva obrobku byla rozdělena na třetiny a postupně bylo vrtáno každým vrtákem 110 otvorů o hloubce 20 mm. Následně byla odvrтанá vrstva frézována a hloubka otvorů v dalších vrstvách byla 25 mm. Tímto způsobem se pokračovalo až do vyčerpání objemových možností obráběného materiálu. Poslední vrstva již nebyla frézována, ale došlo k otočení obrobku dnem vzhůru.

7.3.2 Analýza naměřených dat – opotřebení břitu

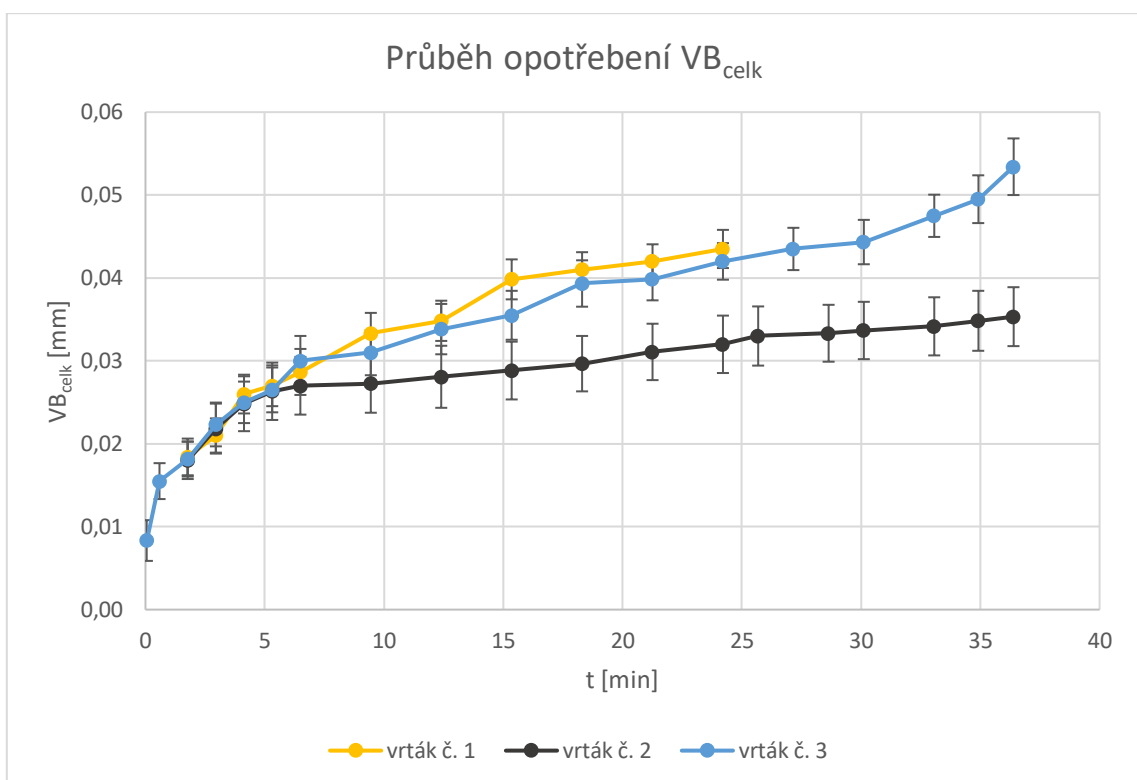
Na každém břitu bylo změřeno opotřebení VB_a , VB_b , VB_c ve vyznačených místech a, b, c. Poté byla výsledná hodnota opotřebení VB_{celk} vypočtena aritmetickým průměrem pro jednotlivý časový úsek vrtání. Následují naměřené hodnoty opotřebení pro jednotlivé břity nástrojů, kdy jsou uvedeny pouze aritmetické průměry \overline{VB} pro jednotlivé břity a jejich celková průměrná hodnota VB_{celk} . Kompletní naměřené hodnoty jsou uvedeny v Příloze č. 2.

V grafickém zobrazení naměřených hodnot s chybou měření je vidět typický průběh opotřebení v závislosti na čase. Z důvodu objemového omezení obrobku bylo rozhodnuto, že v čase vrtání $t > 24,21$ min budou dále zkoumány vrták č. 3 a vrták č. 2, který je nejméně opotřeben na hřbetu. Ani jedním ze zkoumaných nástrojů nebylo dosaženo hodnoty limitního opotřebení. Největší opotřebení VB_{celk} bylo dosaženo vrtákem č. 3.

Tabulka 29: Vybrané naměřené hodnoty opotřebení VB pro jednotlivé nástroje

	t [min]	Pořadové číslo otvoru	První břit	Druhý břit	VB_{celk} [mm]
			\overline{VB} [mm]	\overline{VB} [mm]	
Vrták č. 1	1,77	30	0,020	0,017	0,018
	4,13	70	0,026	0,026	0,026
	6,50	110	0,029	0,028	0,029
	12,40	190	0,035	0,034	0,035
	18,31	270	0,041	0,041	0,041
	24,21	350	0,043	0,044	0,044
Vrták č. 2	1,77	30	0,019	0,017	0,018
	4,13	70	0,031	0,019	0,025
	6,50	110	0,033	0,021	0,027
	12,40	190	0,035	0,021	0,028
	18,31	270	0,036	0,024	0,030
	24,21	350	0,038	0,026	0,032
	30,12	430	0,040	0,027	0,034
	33,07	470	0,041	0,028	0,034
	36,39	515	0,042	0,029	0,035

Vrták č. 3	t [min]	Pořadové číslo otvoru	První břit	Druhý břit	VB_{celk} [mm]
			\overline{VB} [mm]	\overline{VB} [mm]	
	0,06	1	0,010	0,007	0,008
	1,77	30	0,020	0,016	0,018
	4,13	70	0,028	0,022	0,025
	6,50	110	0,033	0,027	0,030
	12,40	190	0,038	0,030	0,034
	18,31	270	0,042	0,037	0,039
	24,21	350	0,044	0,040	0,042
	30,12	430	0,048	0,041	0,044
	33,07	470	0,05	0,045	0,048
	36,39	515	0,055	0,052	0,053



7.3.3 Vyhodnocení opotřebení břitu

Rozvoj opotřebení břitů byl průběžně monitorován v pravidelných časových úsecích pro jednotlivé nástroje. Z každého vrtacího úseku byl vytvořen snímek obou hlavních hřbetů, na kterých bylo vyhodnoceno opotřebení VB podle stanovené metodiky. Odečet hodnot opotřebení byl proveden pomocí detailního přiblížení snímků, jelikož získané hodnoty jsou pouze v řádu setin milimetrů. Z důvodu velkého množství snímků jsou dále v práci uvedeny a popsány pouze vybrané fotografie, které zobrazují intenzitu opotřebení břitu. Následuje chronologický popis opotřebení nástrojů v celém průběhu zkoušek.

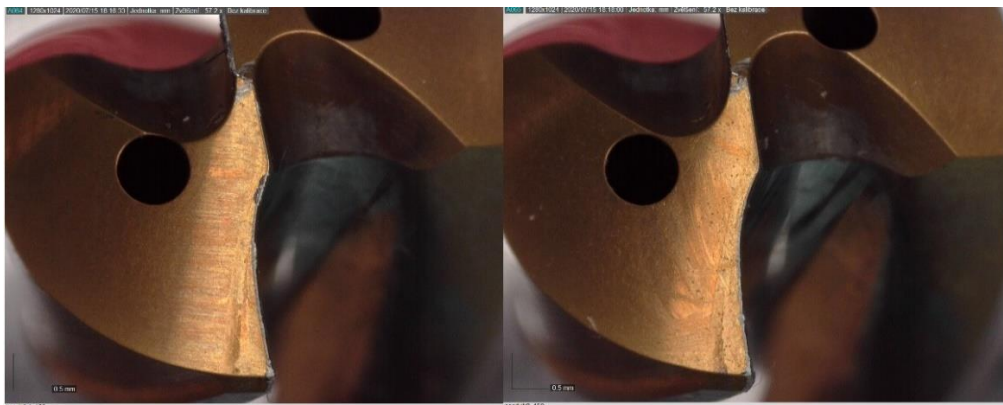
Vrták č. 1

Na snímku níže je vidět stav břitů vrtáku č. 1 po vytvoření prvního otvoru. Materiál obrobku ulpíval na břitu a tím komplikoval vyhodnocení opotřebení. Nicméně nebylo zaznamenáno měřitelné opotřebení VB. Znamky opotřebení bylo vidět pouze v okolí příčného ostří. Na čele docházelo k odstraňování vrchní vrstvy povlaku TiAlSiN + TiSiN. Utvářely se krátké kuželové šroubovité třísky, které byly z hlediska technologie obrábění vhodné.



Obrázek 61: Stav obou hřbetů vrtáku č. 1 po vyvrtání prvního otvoru ($t = 0,06$ min)

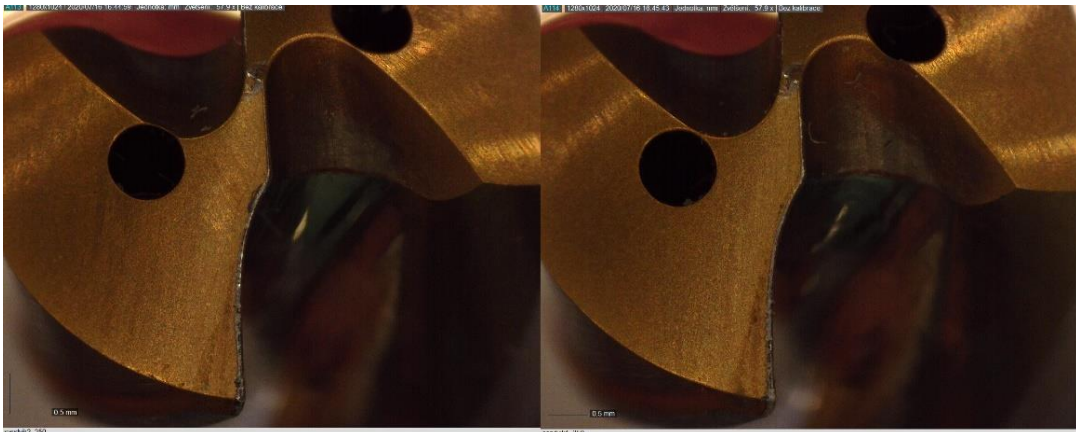
Vrták č. 1 se vyznačoval v další vrtací sekvenci klidným chodem bez slyšitelných vibrací. V čase obrábění $t = 1,77$ min byly již vidět znaky měřitelného opotřebení na hřbetu. Vznikající nárůstek zřejmě přispíval tvorbě delších kuželových šroubovitých třísek a některé z nich již byly vyhodnoceny jako nevhodně utvářené. Nicméně stále převládaly třísky utvářené vhodně. Tvorba nárůstku byla pravděpodobně podpořena větším poloměrem ostří, než obvykle je doporučeno pro obrábění korozivzdorných ocelí. Na obrázku níže jsou vidět již jisté známky tepelného ovlivnění v čase $t = 9,45$ min.



Obrázek 62: Stav obou hřbetů vrtáku č. 1 v čase obrábění $t = 9,45$ min

Austenitická korozivzdorná ocel ulpívala ve větší míře na ostří a vyskytovala se ve formě lupínek. Začínalo se objevovat větší opotřebení VB na jednom z břitů, což může

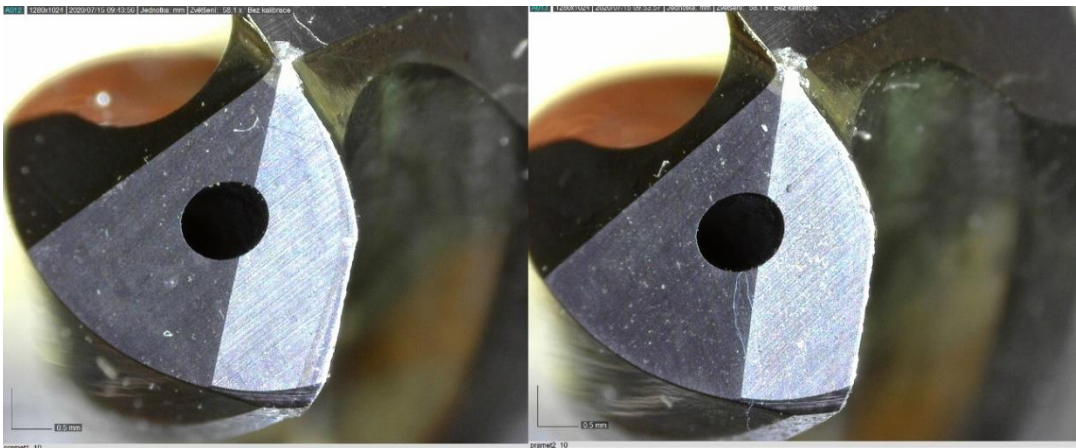
ukazovat nesymetrii nástroje. Docházelo k postupnému prodlužování kuželových šroubovitých třísek, které se tvořily ve větším množství, ale stále převládaly kratší, vhodně utvářené třísky. Oproti předchozímu stavu hřbetu bylo ve větší míře patrné tepelné ovlivnění. Na špičce nástroje byl rozeznán typický průběh lavinovitěho opotřebení. Testování opotřebení břitů pro vrták č. 1 bylo zastaveno při čase obrábění $t = 24,21$ min.



Obrázek 63: Stav obou hřbetů vrtáku č. 1 v čase obrábění $t = 24,21$ min

Vrták č. 2

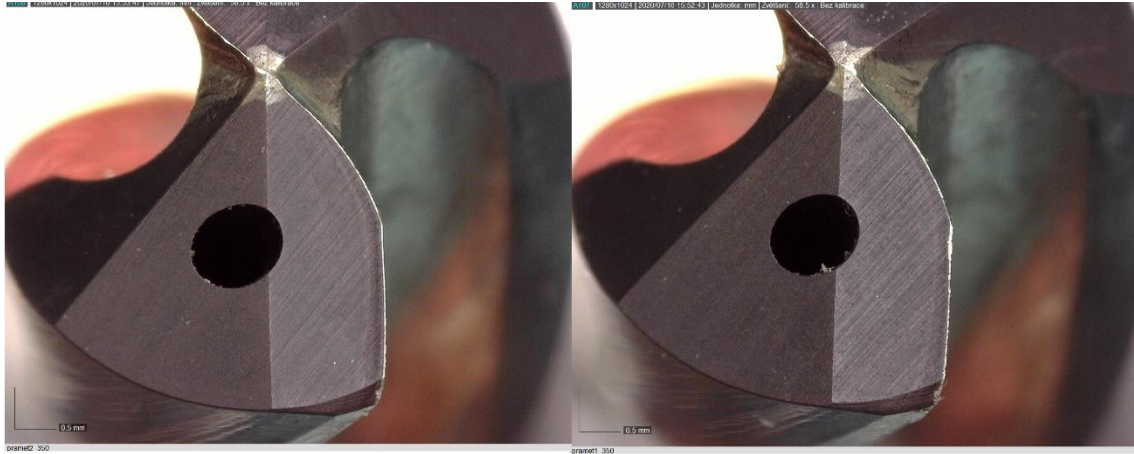
Po prvních vyvrtaných otvorech byl vrták č. 2 rovněž bez známek měřitelného opotřebení. Materiál obrobku ulpíval na ostří, ale nikoli tak výrazně jako tomu bylo u vrtáku č. 1. Vytvářela se elementární tříska a v čase obrábění $t = 0,59$ min bylo rozpoznáno i tepelné ovlivnění na jednom z břitů. Jisté znaky opotřebení byly viděny pouze v oblasti příčného ostří.



Obrázek 64: Stav obou hřbetů vrtáku č. 2 v čase obrábění $t = 0,59$ min

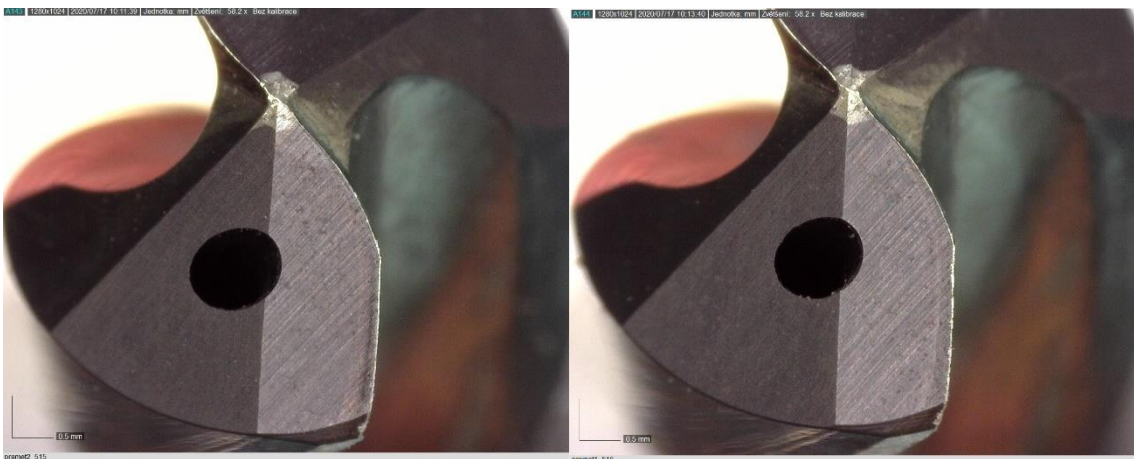
Průběh opotřebení VB plynule narostl do měřitelné podoby. Stále se tvořila elementární tříska a znaky tepelného ovlivnění byly viděny na obou břitech. Dále bylo

pozorováno větší opotřebení na jednom z břitů. Na čele docházelo k odstraňování ochranného povlaku TiAlN. Pravděpodobně vznikal nárůstek, který působil jako ochrana ostří. Bylo zajímavé, že ani v čase obrábění $t = 6,5$ min nebyl pozorován rychlý nárůst opotřebení na špičce.



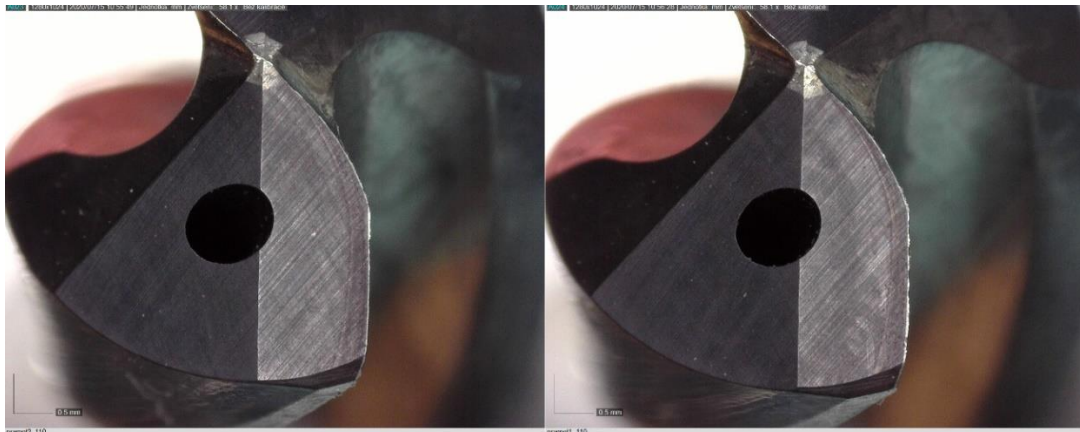
Obrázek 65: Stav obou hřbetů vrtáku č. 2 v čase obrábění $t = 6,5$ min

Přibližně v čase obrábění $t = 9,45$ min docházelo k tvorbě elementárních třísek. V průběhu celé zkoušky byly zaznamenány slyšitelné vibrace a zvyšovala se intenzita opotřebení na jednom břitu.



Obrázek 66: Stav obou hřbetů vrtáku č. 2 v čase obrábění $t = 24,21$ min

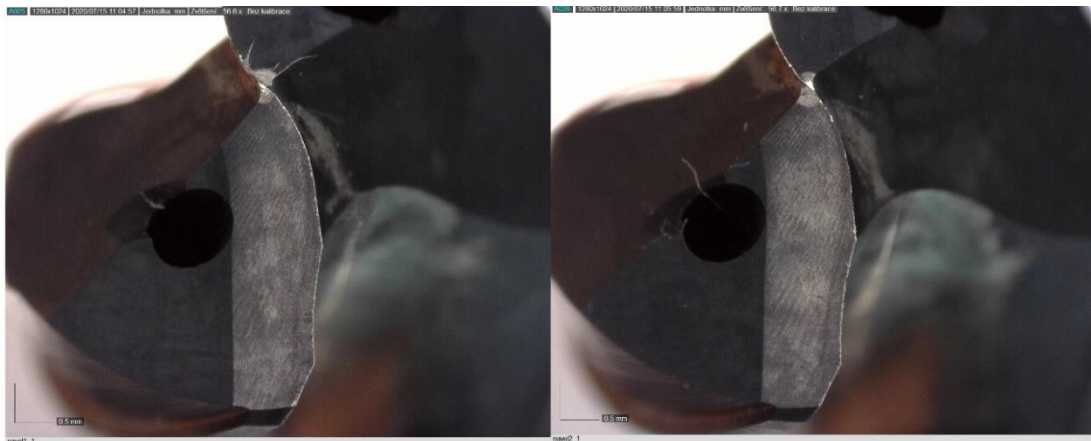
Během zkoušky se tvořila až na výjimky elementární tříška, která je zobrazena na obrázku níže. Opotřebení nástroje bylo i v čase $t = 36,39$ min obtížně viditelné pouhým okem a materiál obrobku ulpíval na ostří. Vibrace byly na stále slyšitelné hladině. Při detailním přiblížení byl pozorován výraznější růst opotřebení břitu VB na špičce.



Obrázek 67: Stav obou hřbetů vrtáku č. 2 v čase obrábění $t = 36,39$ min

Vrták č. 3

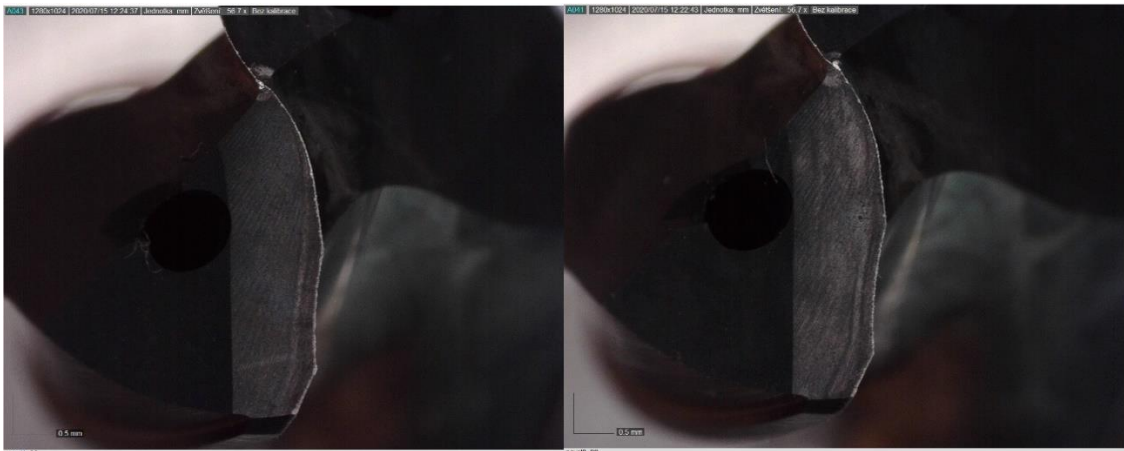
Po vyvrtání prvního otvoru bylo patrné téměř neměřitelné opotřebení. Ze začátku zkoušky se tvořila elementární tříska. Opět bylo pozorováno opotřebení pouze v oblasti příčného ostří a na čele. Vrták č. 3 se odlišoval od ostatních v tom, že na jeho ostří neulpíval materiál obrobku. Po vytvoření prvního otvoru byly dále vidět znaky drobného tepelného ovlivnění na obou břitech v podobě odlišného odstínu na prvním hlavním hřbetu.



Obrázek 68: Stav obou hřbetů vrtáku č. 3 v čase obrábění $t = 0,06$ min

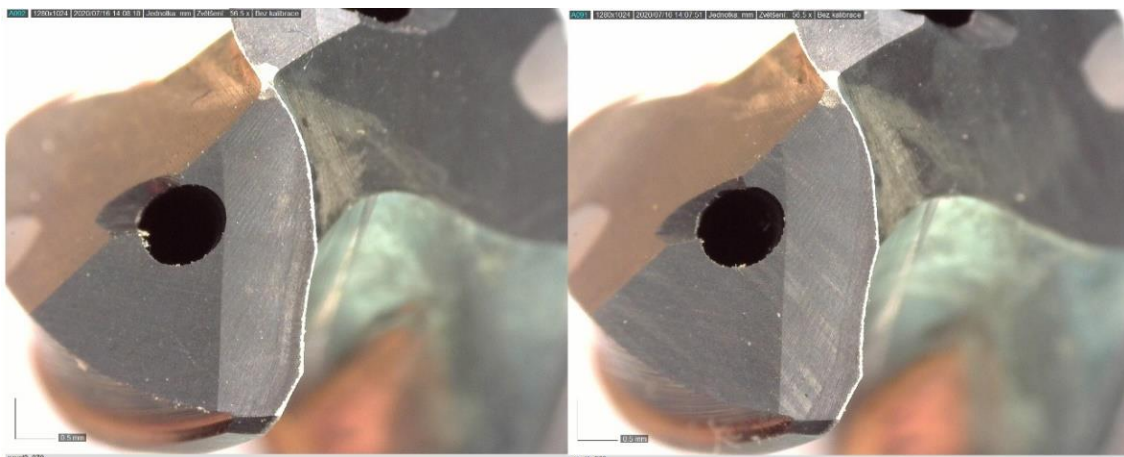
V čase obrábění $t = 1,77$ min se začínaly objevovat dlouhé kuželové šroubovitě třísky. Rostla oblast tepelného ovlivnění a u špičky docházelo k prudkému nárůstu opotřebení VB na jednom z břítů, což by mohlo vést k domněnkám, zda nebyl nástroj broušen nesymetricky. S ohledem na to, že u všech nástrojů nebyly oba břity opotřebeny stejně, tak příčina mohla spočívat spíše v nepřesnosti stroje nebo upínače. V čase

$t = 5,31$ min se stále častěji vytvářely dlouhé kuželové šroubovité třísky, které byly klasifikovány jako nevhodné pro vrtání.

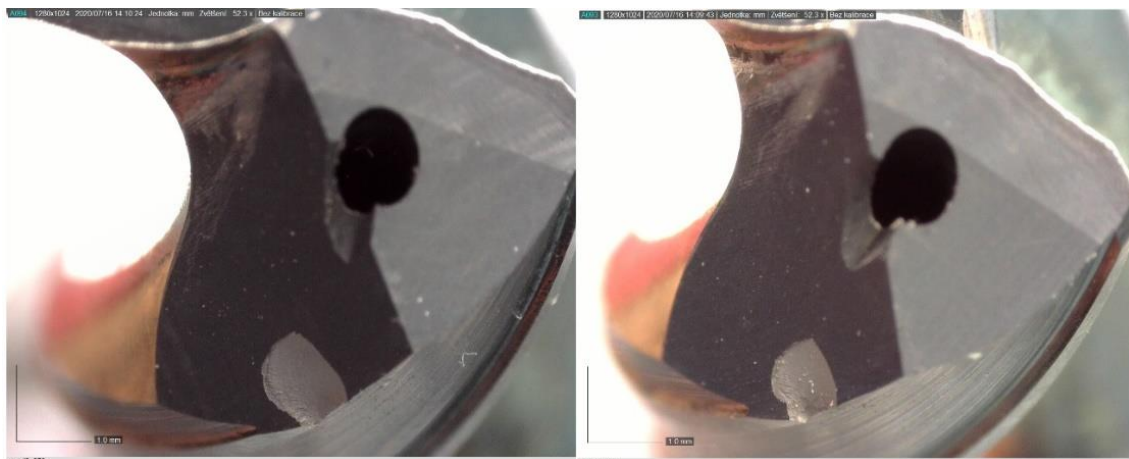


Obrázek 69: Stav obou hřbetů vrtáku č. 3 v čase obrábění $t = 5,31$ min

V dalším časovém úseku se tvořily třísky převážně elementární a výjimečně dlouhé kuželové šroubovité. Podobně jako u vrtáku č. 2 byly zaznamenány vibrace od začátku vrtání. Od času vrtání $t = 12,4$ min se velmi často utvářely dlouhé šroubovité třísky a v okolí tohoto času se utvářely pouze tyto dlouhé třísky. Na obou břitech bylo pozorováno v čase $t = 18,31$ min vyštípnutí na třetím hlavním hřbetu. Na hraně druhé vodící fazetky mohlo dojít ke koncentraci napětí, které způsobilo mělký lom. Velikost vyštípnutí byla dále sledována.

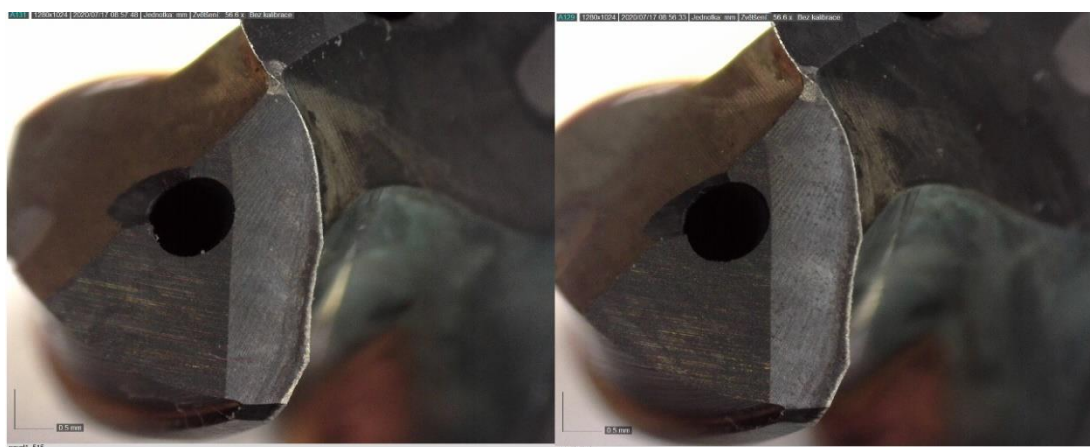


Obrázek 70: Stav obou hřbetů vrtáku č. 3 v čase obrábění $t = 18,31$ min



Obrázek 71: Stav třetích hřbetů vrtáku č. 3 v čase obrábění $t = 18,31$ min

I nadále docházelo k utváření dlouhých šroubových třísek, většina však byla elementárního tvaru. Změna amplitudy vibrací nebyla zaznamenána. Probíhal rozvoj oblasti tepelného ovlivnění, které je na obrázku níže dobře rozeznatelné. Velikost vyštípnuté oblasti se v průběhu zkoušky dále nezvětšovala. Intenzita opotřebení byla větší na jednom z břitů i na konci testování.

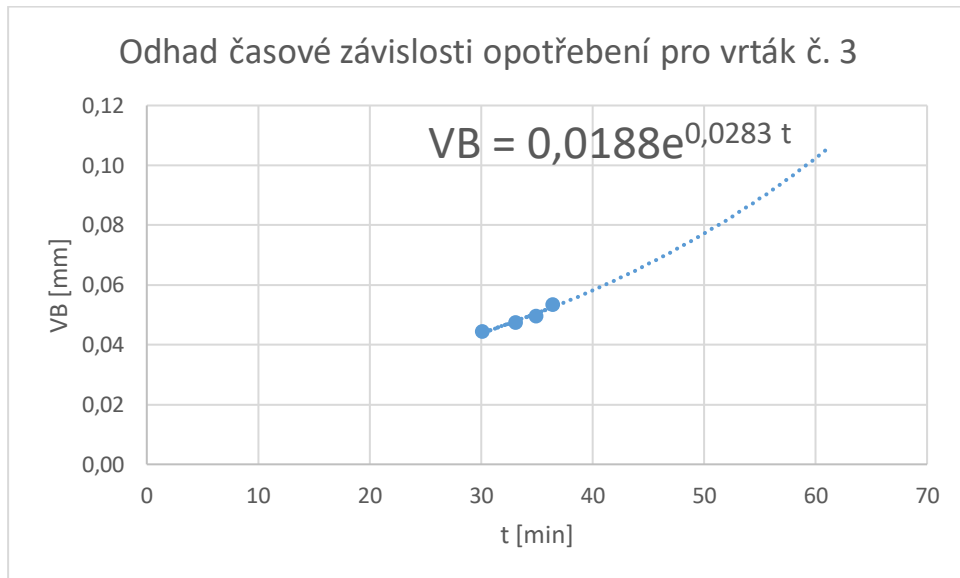


Obrázek 72: Stav obou hřbetů vrtáku č. 3 v čase obrábění $t = 36,39$ min

Souhrn vyhodnocení opotřebení břitu

V průběhu opotřebovací zkoušky vykázaly všechny zkoumané vrtáky znaky rovnoměrného a plynulého nárůstu opotřebení, jak je patrné z naměřených hodnot na přiloženém grafu. U všech měřených nástrojů byly pozorovány první dvě charakteristické oblasti diagramu časové závislosti opotřebení. U vrtáku č. 3 je od času obrábění $t = 30,12$ min vidět strmější nárůst intenzity opotřebení. Při extrapolaci posledních progresivně rostoucích hodnot lze přibližně odhadnout, kdy nastane limitní opotřebení $VB_L = 0,1$ mm. Extrapolace byla provedena pomocí exponenciální funkce,

kteřá je znázorněna v grafu níže. Při dosažení limitního opotřebení $VB_L = 0,1$ mm do zmíněné rovnice je $t = 59,06$ min. Lze tedy přibližně odhadnout, že trvanlivost T tohoto nástroje by při daných podmínkách byla v blízkém okolí vypočtené hodnoty t . Pro zbylé nástroje je vzhledem k malé intenzitě opotřebení nemožné provést tento přibližný výpočet.



U vrtáků č. 1 byl zaznamenán hladký a plynulý chod nástroje v průběhu vrtání. Naopak u vrtáků č. 2 a 3 byly slyšet vibrace, které zřejmě mohly být dány rovinným výbrusem hřbetu, jelikož vrták č. 1 je opatřen šroubovitým výbrusem, který umožňuje snížení posuvové síly a dosažení vyššího posuvu. Na obrázku níže jsou znázorněny tvary vzniklých třísek v průběhu celé zkoušky pro jednotlivé nástroje. Byly vidět značné rozdíly v jednotlivých tvarech třísek, kdy z tohoto pohledu je nejlépe hodnocen vrták č. 2, který po celou dobu testu utvářel pouze elementární třísky.



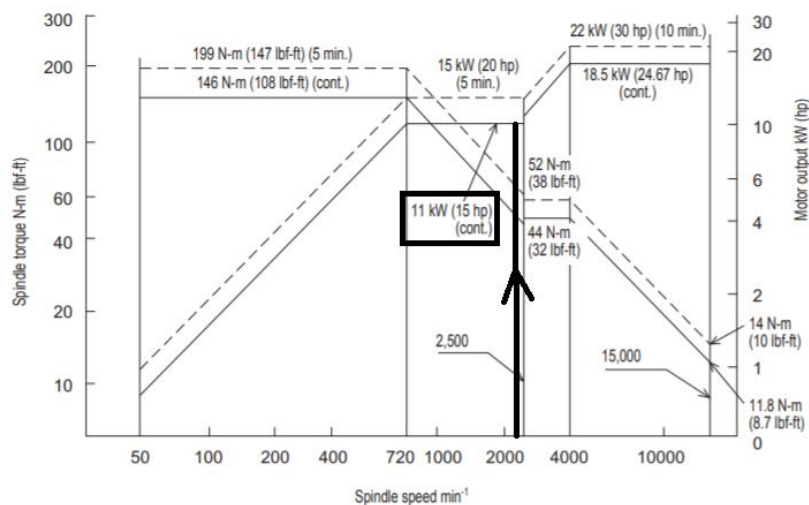
Obrázek 73: Porovnání tvaru utvářených třísek v průběhu celého testování opotřebení bříty

Po odvrtání jedné vrstvy obrobku následovalo čelní frézování, kdy se vytvořila nová plocha pro další průběh opotřebovacích zkoušek. Přerušovaný řez s vysokou intenzitou opotřebovával vyměnitelné břitové destičky na frézovací hlavě a bylo nutné velmi často destičky otáčet, případně měnit za nové. Z tohoto důvodu by pro následující zkoušky bylo vhodné, aby byl obrobek již rozdělen na pásy o přibližné hloubce vrтанých otvorů. Takovým způsobem by se zkouška urychlila a zjednodušila.

7.3.4 Postup měření výkonu, síly posuvu a analýza naměřených dat

V celém průběhu zkoušky opotřebením byl sledován výkon stroje a síla v ose Z pomocí odečtu přímo ze stroje Okuma MU-400 II, na kterém byly zobrazeny aktuální údaje o silovém zatížení. Byly zaznamenávány procentuální hodnoty pro výkon stroje a sílu v ose Z, které byly na obrazovce stroje již zaokrouhleny na celá čísla. Při pravidelném kolísání mezi dvěma hodnotami byla výsledná veličina zprůměrována. Hodnoty výkonu stroje, respektive síly v ose Z, přibližně odpovídají řeznému výkonu P_c , respektive síle posuvu F_f , bez započtení vlivu tření mechanických částí stroje, upnutí apod. Všechny naměřené hodnoty jsou opět uvedeny v Příloze č. 3 a v tabulce níže se nachází pouze vybrané hodnoty měření.

Ze znalosti závislosti výkonu stroje na otáčkách vřetena je dáno, že 100 % výkonu odpovídá 11 kW při otáčkách vřetena $n = 2588 \text{ min}^{-1}$. Odečet byl proveden podle závislosti na obrázku níže. Procenta výkonu stroje mohla být převedena na jednotku soustavy SI, kterou lze dále použít při porovnání s hodnotami získanými z testování silového zatížení bez procesní kapaliny.



Obrázek 74: Průběh výkonu motoru a krouticího momentu vřetena v závislosti na otáčkách vřetena pro Okuma MU-400 II [60]

Pro sílu v ose Z (síla posuvu) nebylo možné zjistit její referenční hodnotu. V důsledku toho nebylo možné provést převod na příslušnou jednotku. Naměřené hodnoty síly posuvu slouží pouze k porovnání mezi jednotlivými nástroji. Výsledná hodnota síly v ose Z byla vypočtena z rozdílu mezi počáteční silou v ose Z a naměřenou silou v ose Z.

Tabulka 30: Vybrané naměřené hodnoty silového zatížení nástrojů

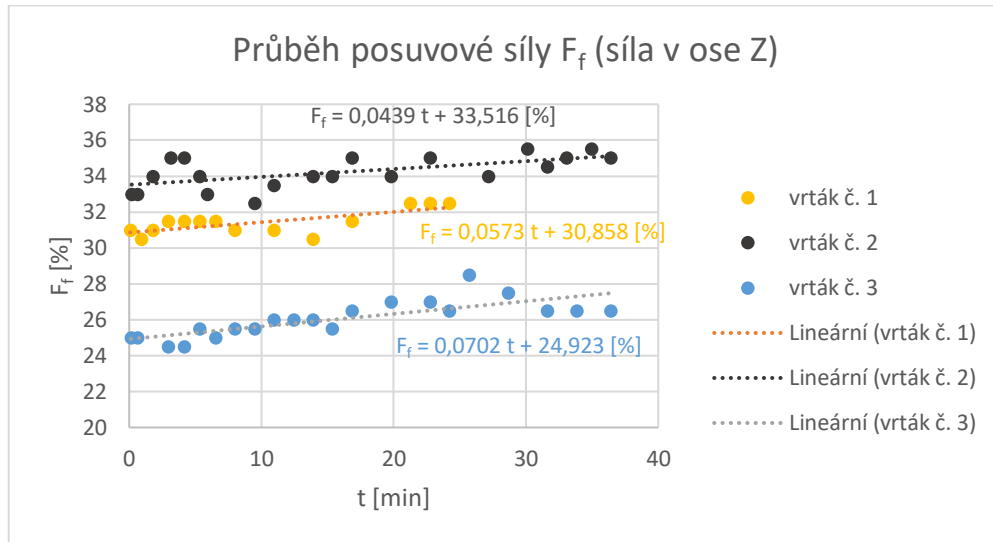
	t [min]	Pořadové číslo otvoru	Výkon stroje [%]	Výkon stroje [kW]	Síla v ose Z [%]
Vrták č. 1	0,06	1	10	1,1	31
	1,77	30	10	1,1	31
	4,13	70	10,5	1,155	31,5
	6,50	110	10,5	1,155	31,5
	10,92	170	10,5	1,155	31
	16,83	250	10,5	1,155	31,5
	24,21	350	11	1,21	32,5
Vrták č. 2	0,18	3	10	1,1	33
	1,77	30	11	1,21	34
	4,13	70	11	1,21	35
	5,90	100	11	1,21	33
	10,92	170	11	1,21	33,5
	16,83	250	11,5	1,265	35
	22,73	330	11,5	1,265	35
	30,12	430	12	1,32	35,5
	33,07	470	12,5	1,375	35
36,39	515	12	1,32	35	
Vrták č. 3	0,12	2	9	0,99	25
	0,59	10	9	0,99	25
	4,13	70	9	0,99	24,5
	6,50	110	9,5	1,045	25
	10,92	170	10	1,1	26
	16,83	250	10	1,1	26,5
	22,73	330	10,5	1,155	27
	28,64	410	10,5	1,155	27,5
	33,81	480	10,5	1,155	26,5
	36,39	515	10,5	1,155	26,5

Vyhodnocení výkonu a síly posuvu

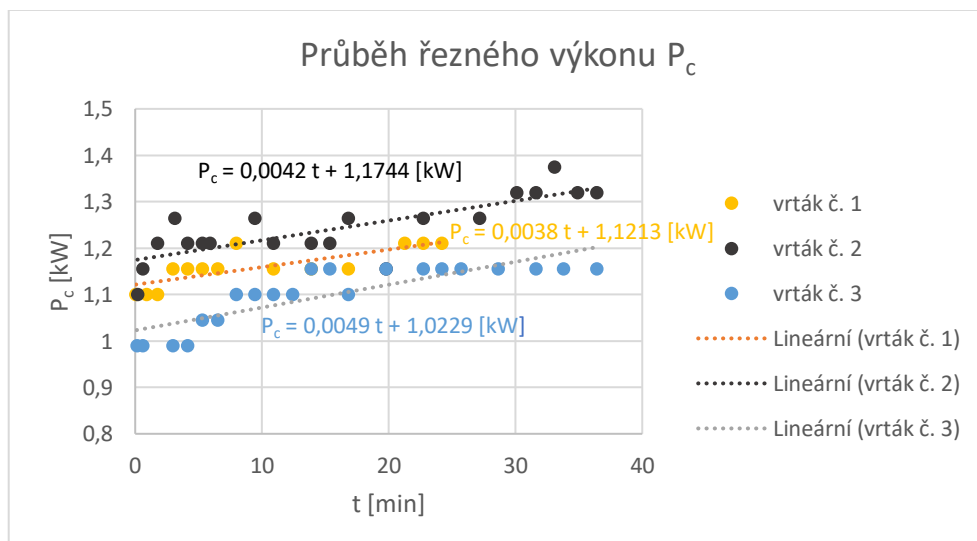
Vyhodnocené hodnoty řezného výkonu P_c a síly posuvu F_f jsou zatíženy značnou nepřesností, která byla dána velkým rozsahem stupnice na obrazovce stroje. Získaná data o průběhu silového zatížení při použití procesní kapaliny nicméně ukazují závislost

na hodnotách opotřebení na břitu VB. Naměřenými hodnotami byla proložena přímka pomocí metody nejmenších čtverců, u které lze lépe sledovat souvislost s průběhem opotřebení.

Pro vrták č. 3 byly na začátku zkoušky naměřeny nejnižší hodnoty síly posuvu a řezného výkonu, ale jejich průběh rostl s největší intenzitou, jenž je vyjádřena koeficientem a v rovnici přímky $y = ax + b$. Nejstrmější nárůst opotřebení ze všech nástrojů byl také zaznamenán pro vrták č. 3.



Opačnou závislost vykazoval vrták č. 2, u kterého byla zaznamenána nejmenší intenzita opotřebení. Rozvoj posuvové síly v závislosti na obráběném čase t probíhal u tohoto nástroje s nejmenším nárůstem. Při sledování průběhu řezného výkonu byla pozorována podobná směrnice proložené přímky jako u vrtáku č. 1. Nicméně to mohlo být způsobeno odečtem hodnot o velmi malém rozsahu (zaznamenávání pouze na celá procenta).



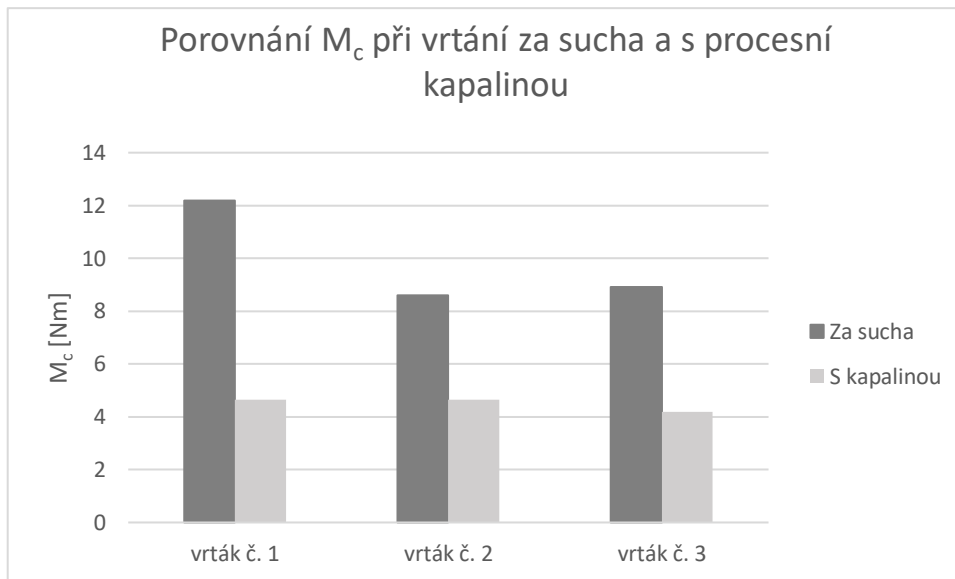
Dále byla hodnocena velikost síly posuvu a řezného výkonu pro jednotlivé nástroje s ohledem na jejich geometrii. Při minimalizaci úhlu příčného ostří se prodlužuje délka příčného ostří, z čehož vyplývá, že by mělo dojít k výraznému zvýšení posuvové síly a řezného výkonu (krouticího momentu). Během testování silového zatížení nástrojů se neprojevil předpoklad o vlivu délky příčného ostří na velikost posuvové síly, kdy s rostoucí délkou příčného ostří by mělo docházet ke zvýšení posuvové síly. Pro jednotlivé nástroje byly naměřeny velmi podobné délky příčného ostří a zejména posuvové síly a řezného výkonu byly značně odlehlé.

U vrtáku č. 2 se ukázala souvislost mezi naměřenou hodnotou úhlu nastavení, která byla ze všech nástrojů nejvyšší, a rovněž byla naměřena nejvyšší průměrná posuvová síla. Pro potvrzení této závislosti by muselo být provedeno detailnější testování. Z provedené zkoušky vyplývá, že existuje tendence mezi naměřenými hodnotami opotřebení VB a silovým zatížením, která odpovídá směrnici přímky růstu posuvové síly a řezného výkonu. Nárůst silového zatížení u zkoumaných nástrojů závisí spíše na kvalitě provedení a přesnosti ostření než na geometrii břitu, které se odlišovaly pouze minimálně.

7.4 Celkové zhodnocení testování

Byly provedeny zkoušky, které se zabývaly opotřebením břitu a silovým zatížením nástrojů při vrtání austenitické korozivzdorné oceli. Během měření silového zatížení za sucha byly aplikovány doporučené řezné podmínky pro vrtání s procesní kapalinou. Doporučení ohledně nutnosti chlazení vrtáků při obrábění korozivzdorných ocelí se potvrdila, jelikož došlo ke křehkému porušení všech vybraných nástrojů. Z tohoto důvodu byl v další části experimentu zabývající se opotřebením břitu zvolena CNC frézka, která již umožňuje doporučený přívod procesní kapaliny vnitřními chladicími kanálky nástroje. V průběhu opotřebovacích zkoušek byly rovněž zaznamenávány hodnoty silového zatížení, a proto mohly být porovnány hodnoty krouticího momentu při vrtání za sucha a s procesní kapalinou, které jsou znázorněny v grafu níže.

Hodnoty krouticího momentu při vrtání bez procesní kapaliny jsou přibližně dvakrát až třikrát větší než při vrtání s procesní kapalinou. Pro další srovnávací zkoušky bylo vhodné ověřit, zda za příčinou vzniku lomů u špičky nástrojů nemůže nastavený vrtací cyklus. Při protočení nástroje po vytvoření otvoru o požadované hloubce by pravděpodobně mohlo dojít k odstranění ulpívající dlouhé třísky, a tím by se mohlo předejít vzniku zmíněných křehkých lomů.



Dále byly testovány nástroje z hlediska jejich opotřebení, které mělo prokázat, jaký nástroj nejlépe odolává zvoleným rezným podmínkám. Z grafu zobrazujícího časový průběh opotřebení VB_{celk} a z přiložených snímků nástrojů vyplývá, že za daných podmínek dosáhl vrták č. 2 nejnižších průměrných hodnot opotřebení na hlavním hřbetu. Vzhledem k limitaci objemu obrobku nemohl být detailněji prozkoumán kompletní průběh opotřebení pro všechny zkoumané vrtáky. Z toho důvodu byl u vrtáku č. 3 použit odhad průběhu opotřebení až do doby trvanlivosti břitu. S ohledem na vysokou náročnost predikce intenzity opotřebení břitu, která je komplexní záležitostí, lze vypočtenou hodnotu trvanlivosti břitu považovat pouze za orientační.



Obrázek 75: Stav obrobku po provedení vrtacích zkoušek

V rámci testování opotřebení břitu byly stanoveny grafické závislosti síly posuvu a kroučícího momentu na čase vrtání. Naměřenými hodnotami byly proloženy lineární

funkce, jejichž směrnice do jisté míry potvrdily výsledky ze zkoušky opotřebení břitu. Pro vrták č. 3 byly naměřeny nejvyšší průměrné hodnoty opotřebení VB_{celk} a zároveň přímkové závislosti síly posuvu a krouticího momentu nejvíce rostly. Podobných výsledků bylo dosaženo s vrtákem č. 2, pro který bylo zaznamenáno nejnižší opotřebení břitu a zároveň nejnižší hodnota směrnice přímky zobrazující průběh síly posuvu za stejný čas vrtání.

Závěr

V rámci rešeršní činnosti byly popsány odlišnosti šroubovitých monolitních vrtáků od ostatních obráběcích nástrojů se zaměřením na charakteristiky způsobů ostření a nejrůznějších úprav zejména v oblasti příčného ostří. Následovalo stanovení forem a hodnocení opotřebení břitu nástroje pro vrtání, které bylo aplikováno v praktické části práce. Rovněž byly uvedeny zvláštnosti a konkrétní doporučení při obrábění především austenitických a duplexních korozivzdorných ocelí.

V další kapitole byl zmapována současná nabídka monolitních nástrojů pro vrtání korozivzdorných ocelí. Uvedené nástroje byly vybrány podle předem stanovených specifikací. Vybraní výrobci produkuje monolitní vrtáky obvykle s úhlem hrotu $2\kappa_r = 140^\circ$ a úhlem stoupání šroubové drážky $\gamma_f = 30^\circ$. Na základě přehledu šroubovitých vrtáků byly vytipovány vhodné nástroje pro provedení vrtacích zkoušek, které byly porovnány s novou geometrií a tvarem vrtáku od společnosti Navel, spol. s.r.o. Z toho důvodu byly provedeny zkoušky opotřebení nástrojů s měřením silového zatížení při vrtání za přítomnosti procesní kapaliny i bez ní. Pro potřebu porovnání vybraných nástrojů byla použita stejná řezná rychlost a shodný posuv.

Během měření silového zatížení bez procesní kapaliny nebylo úspěšně navázáno na předchozí studie, které se zabývaly vrtáním korozivzdorných ocelí bez procesní kapaliny. [61] [62] [63] U všech zkoumaných vrtáků došlo při vrtání prvního otvoru ke křehkému porušení jednoho břitu. Pravděpodobná příčina tohoto jevu spočívala v nevhodně nastaveném vrtacím cyklu, kdy vrták okamžitě vyjel ze zhotoveného otvoru. Při opakování zkoušky by bylo vhodné vrtací cyklus změnit tak, aby se nástroj ve vytvořeném otvoru protočil a ulpívající tříška se odstranila, případně upravit další parametry vrtání, které jsou uvedeny v práci. Hodnoty krouticích momentů při vrtání za sucha a s procesní kapalinou byly rovněž porovnány.

Dále byla stanovena metodika měření opotřebení nástrojů za účelem jejich porovnání. Z výsledků měření šířky plochy opotřebení na hřbetu VB vyplývá, že nejmenší intenzita opotřebení VB za stejný čas vrtání byla naměřena a vyhodnocena u vrtáku č. 2. Pro tento nástroj byla vyhodnocena i nejmenší intenzita nárůstu posuvové síly, což odpovídá obecně platným předpokladům. Žádný ze zkoumaných vrtáků nedosáhl předem stanoveného limitního opotřebení. S ohledem na krátkodobý charakter zkoušek byl pro vrták č. 3 stanoven přibližný odhad, při kterém byla predikována trvanlivost nástroje pro limitní opotřebení VB_L . Rozdíly ve vyhodnocených hodnotách

opotřebení VB pro jednotlivé vrtáky mohly být dány především kvalitou broušení hřbetních ploch. Pro ověření zvolené geometrie od výrobce by bylo vhodné nástroje přestříhat na nezávislém pracovišti a zhodnotit jiný způsob ostření šroubových vrtáků.

Seznam použitých zdrojů

- [1] HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 2. část* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2004 [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-2cast.pdf
- [2] KVASNIČKA, Ivo, Lubomír ŠTAJNOCHR a Vladimír SLAVÍK. *Obráběcí nástroje*. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-010-1755-9.
- [3] HUMÁR, Anton. *Výrobní technologie II* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/VyrobniTecnologie_II.pdf
- [4] SKLENIČKA, Josef. *Příspěvek k experimentálnímu stanovení modelu silového zatížení šroubovitého vrtáku* [online]. Plzeň, 2017 [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/28409/1/Disertace_Sklenicka.pdf. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Miroslav Zetek.
- [5] MÁDL, Jan. *Teorie obrábění*. 1. vyd. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1989.
- [6] STEPHENSON, David a John AGAPIOU. *Metal Cutting Theory and Practice* [online]. Third edition. Boca Raton, FL: CRC Press, 2018 [cit. 2020-03-19]. ISBN 9781315373119.
- [7] PIŠKA, Miroslav a Katrin BUČKOVÁ. *Řezné materiály součastnosti. MM průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rezne-materialy-soucasnosti.html>
- [8] GRZESIK, Wit. *Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications*. Amsterdam: Elsevier, 2008. ISBN 978-0-08-044534-2.
- [9] JANDEČKA, Karel. *Úvod k broušení tvarově složitých nástrojů I*. Vyd. 1. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2009. Knižnice strojírenské technologie. ISBN 978-80-7414-231-4.
- [10] HUMÁR, Anton. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. Brno: CCB, 1995. Tribology and interface engineering series, 56. ISBN 80-858-2510-4.
- [11] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje* [online]. Praha: MM Publishing, 2008 [cit. 2020-03-16]. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [12] SOCHORA, Vjačeslav a Mojmír JÍLEK. *Unikátní kombinovaná technologie PVD povlakování. MM Průmyslové spektrum* [online]. MM publishing, s.r.o., 2018 [cit. 2020-04-01]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/unikatni-kombinovana-technologie-pvd-povlakovani.html>
- [13] BUZKOVÁ, Eva. *Nanokompozitní supertvrde povlaky*. In: *MM průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2014 [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nanokompozitni-supertvrde-povlaky.html>
- [14] ČSN ISO 3002-1. *Řezné nástroje. Základné veličiny pri rezaní a brúsení Časť 1: Geometria aktívnej časti rezných nástrojov. Základné termíny, súradnicové*

- sústavy, nástroje a pracovní úhly, lamače triesky*. Praha: Český normalizační institut, 1993.
- [15] MÁDL, Jan a Ivo KVASNIČKA. *Optimalizace obráběcího procesu*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1998.
- [16] LIPTÁK, Ondrej. *Technológia výroby: Obrábanie*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1979.
- [17] MÁDL, Jan a Jaroslav BARCAL. *Základy technologie II*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2610-8.
- [18] ČSN ISO 5419. *Rezné nástroje. Skrutkovicové vrtáky. Termíny, definície a typy*. Praha: Český normalizační institut, 1993.
- [19] VASILKO, Karol, Dominik MICHEL a Ján HRUBEC. *Brúsenie a ostrenie rezných nástrojov*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1984.
- [20] Způsob ostření vrtáků. In: *StimZet: M&V, spol. s r.o* [online]. [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: https://www.stimzet.cz/data/zpusob_ostreni_cz.html
- [21] *Walter Maschinenbau GmbH - Návod k použití: Programový paket 3. P3_NT008_02*. Tübingen, Německo.
- [22] HUMÁR, Anton. *Technologie obrábění - I. část* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003 [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [23] BILÍK, Oldřich a Jan MÁDL. *Trvanlivost břitu a provozní spolehlivost obráběcího nástroje*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, 2001. Strojírenská technologie. ISBN 80-7044-389-8.
- [24] Obráběné materiály. In: *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>
- [25] ČSN ISO 513. *Klasifikace a použití tvrdých rezných materiálů k obrábění kovů s určenou reznou hranou - Označování skupin a podskupin použití*. 4. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2015.
- [26] MACEK, Karel. *Kovové materiály*. Vyd. 1. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03513-1.
- [27] Sandvik Coromant Adopts ISO 13399. In: *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/us/News/press_releases/pages/sandvik-coromant-adopts-iso-13399.aspx
- [28] *Vrtací nástroje: Katalog společnosti Gühring, s.r.o.* B01 2014, 170 096/16116-VI-8. Gühring, 2014.
- [29] RT100 VA point vs RT100 U point. In: *Gühring, Inc.: Video Library* [online]. [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: <https://www.guhring.com/Videos/Video/?VideoID=23#>
- [30] *Mono machining: Hoffmann Group (catalogue)*. 2019/2020. Germany, 2019.
- [31] Tools news B180G: Beyond the bounds of common sense for Stainless steel drilling. In: *Mitsubishi materials corporation: Mitsubishi Carbide* [online]. Tokyo (Japan), 2010 [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: <http://www.mitsubishicarbide.com/application/files/4814/4643/8984/b180g.pdf>

- [32] MMS (WSTAR): MMS0800X3DB. In: *Mitsubishi materials corporation* [online]. [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: <https://www.mitsubishicarbide.net/mhg/enuk/drilling/10000521/20078991>
- [33] Tools news B207G: New generation solid carbide drills. In: *Mitsubishi materials corporation: Mitsubishi Carbide* [online]. Tokyo (Japan), 2016 [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: http://www.mitsubishicarbide.com/application/files/2514/8481/4205/mve_mvs_b207g.pdf
- [34] 860.1-0800-040A1-MM 2214: Monolitní karbidový vrták CoroDrill® 860. In: *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/Pages/productdetails.aspx?c=860.1-0800-040A1-MM%202214&f=1>
- [35] CoroDrill 860. In: *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/corodrill_860/Pages/default.aspx
- [36] 860.1-0800-025A1-GM X1BM: Monolitní karbidový vrták CoroDrill® 860. In: *Sandvik Coromant* [online]. 2020 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/Pages/productdetails.aspx?c=860.1-0800-025A1-GM%20X1BM>
- [37] Nástroje: Typ WPC VA. In: *WNT: Ceratizit Group* [online]. [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: https://www.wnt.com/mastertool/?fcode=m_ca_bd_catdetail&m_ca_bd_GV_objky=11623080&L=17
- [38] New products for cutting tool engineers: WTX Speed, WTX Feed. In: *WNT: Ceratizit Group* [online]. [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: https://www.wnt.com/fileadmin/content/images/products/pdf-files/Upgrade_WTX_Speed___WTX_Feed-en-zh.pdf
- [39] FILOVÁ, Lucie. Nové rozšíření řady WTX vrtáků. *MM průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nove-rozsireni-rady-wtx-vrtaku.html>
- [40] *Kompletní katalog Walter AG: B - Vrtání a závitování*. Walter, 2017.
- [41] *Dormer Pramet: Katalog*. 2019.
- [42] Vysoce výkonné monolitní karbidové vrtáky: Force M, Force X. In: *Dormer Pramet* [online]. 2018 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.dormerpramet.com/Downloads/DORMER%202018%20CZ.pdf>
- [43] Nástroje STIMZET: Monolitní SK vrták. In: *Stim Zet* [online]. [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: https://www.stimzet.cz/data/sk6537-3dic_cz.html
- [44] DIN 6537. *Stepped parallel shank solid hardmetal twist drills - Dimensions*. Berlin: DIN Deutsche Institut für Normung, 1993.
- [45] WTX – HFDS solid carbide drill. In: *Ceratizit Group* [online]. 2020 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://cuttingtools.ceratizit.com/gb/en/wtx-hfds>
- [46] Katalog rezných nástrojů: 2019. In: *Společnost Navel, spol. s.r.o.* [online]. [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: <https://navel.cz/wp-content/uploads/2019/11/Navel-katalog-pro-rok-2019-CZ.pdf>

- [47] MÁDL, Jan. *Experimentální metody v teorii obrábění*. 4. přeprac. vyd. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1988.
- [48] Testování PVD povlaků na rychlořezných vrtácích. *MM Průmyslové spektrum* [online]. MM publishing, s.r.o., 2001 [cit. 2020-05-05]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/testovani-pvd-povlaku-na-rychloreznych-vrtacich.html>
- [49] PIŠKA, Miroslav. Nová metodika hodnocení řezných vlastností nástrojů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. MM publishing, s.r.o., 2017 [cit. 2020-05-07]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nova-metodika-hodnoceni-reznych-vlastnosti-nastroju.html>
- [50] DVOŘÁČEK, Jan. *Testování nástrojů pro víceosé frézování na obráběcích centrech* [online]. Brno, 2016 [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=136351. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Miroslav Piška.
- [51] ŠIMŮNEK, Dalibor, Antonín KRÍŽ a Olga BLÁHOVÁ. Hodnocení opotřebení břitu nástrojů s tenkou otěruvzdornou vrstvou. *METAL 2003* [online]. Hradec nad Moravicí, 2003 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: http://metal2013.tanger.cz/files/proceedings/metal_03/papers/192.pdf
- [52] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění: učební text* [online]. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2011 [cit. 2020-06-22]. ISBN 978-80-248-2533-5. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Experimentalni_metody_%20v_obrazeni.pdf
- [53] VESELÝ, Václav. *Průběžné sledování opotřebení obráběcího nástroje* [online]. Brno, 2018 [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: https://is.mendelu.cz/lide/clovek.pl?zalozka=13;id=3131;studium=91639;zp=59766;download_prace=1. Diplomová práce. Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta. Vedoucí práce Michal Černý.
- [54] Charakteristika nerezových ocelí: DIN 1.4301, AISI 304, ČSN 17240. In: *KÖNIGFRANKSTAHL, s.r.o.* [online]. 2017 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <http://www.koenigfrankstahl.cz/?menu=234>
- [55] ČSN EN 10088-1. *Korozivzdorné oceli - Část 1: Přehled korozivzdorných ocelí*. Praha: Český normalizační institut, 2015.
- [56] 1.4301 LEGOVANÁ UŠLECHTILÁ OCEL, AUSTENITICKÁ SE SNÍŽENÝM OBSAHEM UHLÍKU. In: *AK 1324, S.R.O.* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <http://www.ak1324.cz/jakost-1-4301/>
- [57] PARTINGTON, Eric. *Korozivzdorné oceli v potravinářském a nápojářském průmyslu* [online]. 1. vyd. Euro Inox, 2008 [cit. 2020-06-17]. ISBN 978-2-87997-191-9. Dostupné z: https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/StSt_in_FoodandBeverage_CZ.pdf
- [58] ČSN EN 10088-2. *Korozivzdorné oceli - Část 2: Technické dodací podmínky pro plechy a pásy z ocelí odolných korozi pro obecné použití*. Praha: Český normalizační institut, 2015.

- [59] Používané CNC stroje. In: *Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie* [online]. [cit. 2020-07-10]. Dostupné z: <http://technologie.fs.cvut.cz/provide/obrabeni>
- [60] *Interní dokumentace k CNC frézce Okuma MU-400 II dostupná v halových laboratořích Fakulty strojní ČVUT v Praze.*
- [61] JURKO, Jozef a Anton PANDA. Change of Material Deformation under the Machined Surface when Drilling Steel C45 and DIN 1.4301. *Applied Mechanics and Materials* [online]. (459), 428-431 [cit. 2020-07-26]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.459.428. ISSN 1662-7482. Dostupné z: <https://www.scientific.net/AMM.459.428>
- [62] JURKO, Jozef a Anton PANDA. Study of the Tool Life and the Tool Wear Mechanisms in the Production of Holes in Stainless Steel. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2012, (459), 424-427 [cit. 2020-07-26]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.459.424. ISSN 1662-7482. Dostupné z: <https://www.scientific.net/AMM.459.424>
- [63] JURKO, Jozef a Anton PANDA. Verification of Surface Finish as an Indicator of Machinability in Drilling of Stainless Steel by DIN 1.4301. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2012, (229-231), 415-415 [cit. 2020-07-26]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.229-231.415. ISSN 1662-7482. Dostupné z: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.229-231.415>
- [64] DE VOS, Patrick. Příručka pro technology: Proces obrábění kovů - životnost nástrojů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, s.r.o., 2012 [cit. 2020-06-15]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-proces-obrabeni-kovu-zivotnost-nastroju.html>

Seznam použitých obrázků

Obrázek 1: Kinematika vrtání šroubovým vrtákem [3]	11
Obrázek 2: Průřez třísky při vrtání dvoubřitým šroubovým vrtákem [1]	12
Obrázek 3: Rozklad sil při vrtání [4].....	13
Obrázek 4: Vrtací nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami od společnosti Sandvik Coromant [1].....	17
Obrázek 5: Světová spotřeba nástrojových materiálů v současnosti [7]	18
Obrázek 6: Geometrie šroubovitého vrtáku [4]	23
Obrázek 7: Závislost šířky opotřeбенé plochy hřbetu VB na úhlu nastavení κ_r [15]	26
Obrázek 8: Závislost síly posuvu F_f na uvažovaném bodu ostří vrtáku [6]	28
Obrázek 9: Detailní popis šroubovitého vrtáku [1] [14] [18]	29
Obrázek 10: Způsoby podbroušení hlavního hřbetu šroubovitých vrtáků [1].....	30
Obrázek 11: Příklad dalších výbrusů monolitních vrtáků [21].....	32
Obrázek 12: Vliv rezných podmínek na opotřebení [64]	33
Obrázek 13: Vliv teploty na jednotlivé mechanismy opotřebení [5]	33
Obrázek 14: Oblasti opotřebení vrtáku [6]	34
Obrázek 15: Příklad opotřebení na příčném ostří a hřbetu [6]	35
Obrázek 16: Různé parametry šířky opotřeбенé plochy na hřbetu a špičce vrtáku [5]...35	
Obrázek 17: Časová závislost opotřebení pro různé nástrojové materiály [5]	36
Obrázek 18: Závislost opotřebení VB na čase pro různou kvalitu ostření nástrojů [15] 36	
Obrázek 19: Závislost charakteristik procesu řezání na šířce opotřeбенé plochy na hřbetu [23]	37
Obrázek 20: Příklad značení rozměrů a geometrie vrtacího nástroje podle ISO 13399–1 [27]	42
Obrázek 21: Vrták RT 100 VA ze série 8510 [28]	43
Obrázek 22: Porovnání vybroušení druhého hlavního hřbetu RT 100 VA a RT 100 U [29]	43
Obrázek 23: Porovnání tvaru drážky RT 100 VA a RT 100 U [29]	43
Obrázek 24: Vrták 122380 [30]	44
Obrázek 25: Vrták 122404 [30]	44
Obrázek 26: Vrták 122435 [30]	45
Obrázek 27: Vrták MMS0800X3DB [31]	46
Obrázek 28: Vrták z řady CoroDrill 860 – MM [35]	47
Obrázek 29: Vrták z řady CoroDrill 860 – GM [35].....	47
Obrázek 30: Vrták WPC VA [37].....	48
Obrázek 31: Vrták WTX Speed (řezná část) [39].....	49
Obrázek 32: Vrták WTX Feed (řezná část) [39].....	49
Obrázek 33: Vrták A3289DPL–8 [40]	50
Obrázek 34: Vrták A3293TTP–8 [40].....	50
Obrázek 35: Vrták R4578.0 [41].....	51
Obrázek 36: Řezná část vrtáku z řady Force M [42].....	51
Obrázek 37: Vrták R4678.0 [42].....	52
Obrázek 38: Vrták F510800V700S značky Stimzet [43].....	52
Obrázek 39: Značení jednotlivých částí vrtáku podle normy DIN 6537 [44]	53
Obrázek 40: Směry snímání drsnosti povrchu [51].....	59
Obrázek 41: Rozložení vrtaných otvorů na obráběném materiálu.....	62
Obrázek 42: Stav vrtáků před experimentem	63
Obrázek 43: Měření úhlu hrotu $2\kappa_r$	63
Obrázek 44: CNC frézka VMC 500.....	65

Obrázek 45: Svislá 5-ti osá CNC frézka Okuma MU-400 II.....	65
Obrázek 46: Rotační dynamometr Kistler typ 9123C a zapojení do CNC frézky VMC 500	66
Obrázek 47: Kamera a držák s kleštinovým upínačem v poloze pro měření opotřebením na hřbetu	66
Obrázek 48: Nastavení záznamu hodnot v programu DynoWare.....	67
Obrázek 49: Vyhodnocení krouticího momentu s vyznačenou hodnotou M_{c0} pro vrták č.3	68
Obrázek 50: Vyhodnocení krouticího momentu s vyznačenou hodnotou M_{c1} pro vrták č. 3.....	68
Obrázek 51: Vyhodnocení síly posuvu s vyznačenou hodnotou pro F_{f0} pro vrták č. 3 ..	69
Obrázek 52: Vyhodnocení síly posuvu s vyznačenou hodnotou F_{f1} pro vrták č. 3.....	69
Obrázek 53: Oba břity vrtáku č. 2 po měření silového zatížení.....	71
Obrázek 54: Oba břity nástroje č. 3 po měření silového zatížení	71
Obrázek 55: Oba břity vrtáku od TKZ Polná, spol. s.r.o.(vrták č. 4) po měření silového zatížení.....	71
Obrázek 56: Destrukce vrtáku č. 1 po měření silového zatížení.....	71
Obrázek 57: Tvary třísek po zkoušce silového zatížení pro jednotlivé nástroje	72
Obrázek 58: Upnutí obrobku na pracovní stůl stroje Okuma MU-400 V II.....	73
Obrázek 59: Části ostří pro odečet hodnot opotřebením VB.....	74
Obrázek 60: Nastavené zvětšení v programu DinoCapture 2.0.....	74
Obrázek 61: Stav obou hřbetů vrtáku č. 1 po vyvrtání prvního otvoru ($t = 0,06$ min) ...	77
Obrázek 62: Stav obou hřbetů vrtáku č. 1 v čase obrábění $t = 9,45$ min.....	77
Obrázek 63: Stav obou hřbetů vrtáku č. 1 v čase obrábění $t = 24,21$ min.....	78
Obrázek 64: Stav obou hřbetů vrtáku č. 2 v čase obrábění $t = 0,59$ min.....	78
Obrázek 65: Stav obou hřbetů vrtáku č. 2 v čase obrábění $t = 6,5$ min	79
Obrázek 66: Stav obou hřbetů vrtáku č. 2 v čase obrábění $t = 24,21$ min.....	79
Obrázek 67: Stav obou hřbetů vrtáku č. 2 v čase obrábění $t = 36,39$ min.....	80
Obrázek 68: Stav obou hřbetů vrtáku č. 3 v čase obrábění $t = 0,06$ min.....	80
Obrázek 69: Stav obou hřbetů vrtáku č. 3 v čase obrábění $t = 5,31$ min.....	81
Obrázek 70: Stav obou hřbetů vrtáku č. 3 v čase obrábění $t = 18,31$ min.....	81
Obrázek 71: Stav třetích hřbetů vrtáku č. 3 v čase obrábění $t = 18,31$ min.....	82
Obrázek 72: Stav obou hřbetů vrtáku č. 3 v čase obrábění $t = 36,39$ min.....	82
Obrázek 73: Porovnání tvaru utvářených třísek v průběhu celého testování opotřebením břitu	83
Obrázek 74: Průběh výkonu motoru a krouticího momentu vřetena v závislosti na otáčkách vřetena pro Okuma MU-400 II [60]	84
Obrázek 75: Stav obrobku po provedení vrtacích zkoušek	88

Seznam použitých tabulek

Tabulka 1: Vlastnosti slinutých karbidů [2] [5].....	22
Tabulka 2: Základní geometrie šroubových vrtáků podle materiálu obrobku [16]	27
Tabulka 4: Tvary výbrusů u šroubových vrtáků dle DIN 1412 [9] [20]	31
Tabulka 5: Rozdělení obráběných materiálů a jejich barevné označení [24] [25].....	38
Tabulka 6: Vybrané označení z normy ISO 13399–1 [27].....	42
Tabulka 7: Vrták typu RT 100 VA ze série 8510 - geometrie, rozměry a doporučené řezné podmínky pro austenitickou korozivzdornou ocel [28]	43
Tabulka 8: Vrták 122380 8 od společnosti Hoffmann Group – geometrie, rozměry a doporučené řezné podmínky pro austenitickou korozivzdornou ocel [30]	44
Tabulka 9: Vrták 122435 8 od společnosti Hoffmann Group – geometrie, rozměry a doporučené řezné podmínky pro austenitickou korozivzdornou ocel [30]	45
Tabulka 10: Vrták MMS0800X3DB od společnosti Mitsubishi Materials – geometrie, rozměry a doporučené řezné podmínky pro austenitickou korozivzdornou ocel [32]....	45
Tabulka 11: Vrták 860.1–0800–024A1–MM 2214 od společnosti Sandvik Coromant – geometrie, rozměry a doporučené řezné podmínky pro austenitickou korozivzdornou ocel [34].....	46
Tabulka 12: Vrták 860.1–0800–025A1–GM X1BM od společnosti Sandvik Coromant – geometrie, rozměry a doporučené řezné podmínky pro austenitickou korozivzdornou ocel [36].....	47
Tabulka 13: Vrták typu WPC VA od společnosti Ceratizit Group – geometrie, rozměry a doporučené řezné podmínky pro austenitickou korozivzdornou ocel [37].....	48
Tabulka 14: Vrták WTX Speed od společnosti Ceratizit Group – geometrie, rozměry a doporučené řezné podmínky pro austenitickou korozivzdornou ocel [38]	49
Tabulka 15: Vrták WTX Feed od společnosti Ceratizit Group – geometrie, rozměry a doporučené řezné podmínky pro austenitickou korozivzdornou ocel [38]	49
Tabulka 16: Vrták A3289DPL–8 od společnosti Walter AG – geometrie, rozměry a doporučené řezné podmínky pro austenitickou korozivzdornou ocel [40]	50
Tabulka 17: Vrták R4578.0 od společnosti Dormer Pramet – geometrie, rozměry a doporučené řezné podmínky pro austenitickou korozivzdornou ocel [41]	51
Tabulka 18: Vrták R4678.0 od společnosti Dormer Pramet – geometrie, rozměry a doporučené řezné podmínky pro austenitickou korozivzdornou ocel [42]	52
Tabulka 19: Vrták F510800V700S značky Stimzet – geometrie, rozměry a doporučené řezné podmínky pro austenitickou korozivzdornou ocel [43]	52
Tabulka 20: Souhrn základních rozměrů a geometrie vybraných šroubových vrtáků..	54
Tabulka 21: Chemické složení oceli X5CrNi18–10 (1.4301) v hm. % podle normy ČSN EN 10088–1 [55].....	61
Tabulka 22: Mechanické vlastnosti oceli X5CrNi18–10 (1.4301) podle normy ČSN EN 10088–2 [58].....	62
Tabulka 23: Fyzikální vlastnosti oceli X5CrNi18–10 (1.4301) podle normy ČSN EN 10088–2 [58].....	62
Tabulka 24: Naměřená geometrie a povlaky zkoumaných vrtáků.....	63
Tabulka 25: Základní parametry CNC frézky VMC 500 [59].....	65
Tabulka 26: Základní parametry 5-ti osé CNC frézky Okuma MU-400 II.....	65
Tabulka 27: Stanovení řezných podmínek pro testování silového zatížení.....	67
Tabulka 28: Vyhodnocené hodnoty silového zatížení nástrojů	69
Tabulka 29: Stanovení řezných podmínek pro testování opotřebení břitu.....	73
Tabulka 30: Vybrané naměřené hodnoty opotřebení VB pro jednotlivé nástroje	75
Tabulka 31: Vybrané naměřené hodnoty silového zatížení nástrojů	85

Seznam příloh

Příloha č. 1: Testování silového zatížení vybraných nástrojů

Příloha č. 2: Testování průběhu opotřebení břitů I

Příloha č. 3: Testování průběhu opotřebení břitů II