

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ



FAKULTA STROJNÍ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI

KATEDRA
TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ

DISERTAČNÍ PRÁCE

k získání akademického titulu doktor
ve studijním programu: Strojírenská technologie – technologie obrábění

Studie problematiky zvyšování řezivosti nástroje při frézování feriticko-martenzitické oceli P91

Autor: Ing. Jaroslava Fulemová

Školitel: Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.

Plzeň 2017

PROHLÁŠENÍ O AUTORSTVÍ

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě disertační práci, jejíž rámcové téma je „Studie problematiky zvyšování řezivosti nástroje při frézování feriticko-martenzitické oceli P91“.

Tato práce je koncipována dle požadavku Studijního a zkušebního řádu Západočeské univerzity v Plzni, tj. obsahuje zejména shrnutí a zhodnocení poznatku ve studované oblasti a seznam souvisejících publikací.

Prohlašuji, že jsem tuto písemnou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

AUTORSKÁ PRÁVA

Podle Zákona o právu autorském. č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. CR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledku práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěla poděkovat především svému školiteli Doc. Ing. Janu Řehořovi, Ph.D. za odborné vedení a motivaci při řešení této práce. Dále bych ráda poděkovala kolektivu Laboratoře Technologie Obrábění a Dílenské Metrologie za podporu při zpracovávání práce. V neposlední řadě patří mé poděkování také Ing. Zdeňku Jandovi, Ph.D. a mým rodičům, ti všichni mi byli oporou jak ve studiu, tak v osobním životě. Děkuji.

ANOTACE

Téma disertační práce je zaměřeno do oblasti zvyšování řezivosti nástroje pomocí úpravy ostří. Pojem úprava ostří zahrnuje jednotlivé způsoby technologické úpravy ostří nástroje s cílem vytvořit jeho definovaný tvar a rozměr. Tvar a rozměr řezného ostří je možné popsat parametry r_n a K , tedy poloměrem zaoblení a faktorem symetričnosti ostří. Cílenou úpravou ostří lze docílit zvýšení pevnosti a snížení drsnosti ostří, což ve výsledku povede ke kýženému zvýšení řezivosti nástroje. Hlavním cílem této disertační práce je tedy popsat vliv různých způsobů úprav mikro-geometrie bříty na řezivost nástroje s tzv. wiper geometrií při dokončovacím rovinném frézování oceli P91.

Teoretická část práce ve svém úvodu definuje pojem mikro-geometrie bříty a popisuje význam úpravy ostří. Dále jsou představeny vybrané technologické procesy pro úpravu řezného bříty a jejich pozitivní vliv na řezivost nástroje. Na základě hodnocení těchto podkladů jsou shrnuty poznatky o dané problematice a stanoveny cíle disertační práce.

Praktická část práce je orientována na experimentální studium vlivu jednotlivých úprav na měřitelné parametry řezného procesu, kterými jsou opotřebení řezného nástroje, řezné síly, drsnost obrobeného povrchu, tvar a hmotnost vznikajících třísek. Tato část práce je rozdělena do tří podkapitol a v každé z nich je řešen rozdílný soubor jevů. Cílem první podkapitoly je na základě variace řezných podmínek vybrat podmínky pro následující experimentální řešení. K těmto podmínkám budou vztahovány výsledky experimentů ostatních podkapitol. Druhá podkapitola pojednává o volbě vhodného poloměru zaoblení ostří. Volba r_n je však limitována maximální axiální hloubkou řezu. Třetí podkapitola popisuje vliv proměnného faktoru symetričnosti ostří na výše specifikované měřitelné parametry řezného procesu.

Na závěr je provedeno celkové shrnutí a diskuze výsledků. Přínosem práce je detailní analýza vlivu jednotlivých úprav ostří na řezný proces a stav obrobeného povrchu.

ANNOTATION

The Ph.D. thesis is focused on a topic which can be called Increasing of cutting tool power by cutting edge preparation. A concept of cutting edge preparation includes different ways of technological preparation with the aim to create its defined shape and dimension. The shape and dimension of a cutting edge is possible to describe with following parameters r_n and K , which means cutting edge radius and K-factor. It is possible to reach higher strength and lower roughness of cutting edge by targeted preparation which results in increasing cutting tool power. The main aim of this Ph.D. thesis will be describe the influence of different micro-geometry preparation technologies on cutting power of IN04S cutting tool during finishing milling of P91.

The theoretical part deals with definition of words like macro and micro-geometry and describes the importance of cutting edge preparation. Further there are introduced selected technological processes and their benefits on cutting power. Based on evaluation of these literary sources there are summarized findings and set goals of the Ph.D. thesis.

Practical part is oriented on experimental study of the influence of different cutting edge preparation technologies on measurable parameter which is tool wear, cutting forces, surface roughness of machined workpiece, shape and weight of chips. This part of the thesis is divided into three subchapters and each of them is solved different set of phenomena. First subchapter solves the choice of cutting conditions for the cutting tool IN04S. The second subchapter deals with choosing appropriate cutting edge radius. The cutting edge radius is limited by value of maximal axial depth of cut. Last subchapter works with the influence of changing K-factor on above listed measurable parameters of cutting process.

At the end there is done overall summary and discussion of results. The results of this Ph.D. thesis are analysis and evaluation of different cutting edge preparations on cutting process and state of machined surface.

OBSAH

1. ÚVOD	10
2. GEOMETRIE A MIKRO-GEOMETRIE BŘITU	12
2.1 VÝZNAM ÚPRAVY OSTŘÍ	15
3. TECHNOLOGIE ÚPRAVY MIKRO-GEOMETRIE BŘITU	17
3.1 KARTÁČOVÁNÍ.....	17
3.2 ELEKRO-EROZIVNÍ ÚPRAVA OSTŘÍ	18
3.3 VLEČNÉ OMÍLÁNÍ	19
3.4 PÍSKOVÁNÍ	21
3.5 LASER.....	23
3.6 MAGNETICKÉ LEŠTĚNÍ.....	24
3.7 BROUŠENÍ	26
4. OBECNÝ PŘÍNOS ÚPRAVY MIKRO-GEOMETRIE BŘITU NA ŘEZIVOST NÁSTROJE	28
4.1 ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU VLIVU ÚPRAV MIKRO-GEOMETRIE BŘITU NA ZVÝŠENÍ ŘEZIVOSTI	35
5. SHRUTÍ POZNATKŮ A STANOVENÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE	36
5.1 POZNATKY.....	36
5.2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	37
5.3 POSTUP ŘEŠENÍ PROBLEMATIKY ZVYŠOVÁNÍ ŘEZIVOSTI NÁSTROJE IN04S.....	38
5.4 KRITERIÁLNÍ PODMÍNKY EXPERIMENTÁLNÍHO OBRÁBĚNÍ.....	39
5.5 CHARAKTERISTIKA NÁSTROJE IN04S.....	39
5.6 KLASIFIKACE MATERIÁLU OBROBKU	40
6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	43
6.1 TEST ŘEZIVOSTI ORIGINÁLNÍ VBD IN04S	43
6.1.1 Analýza mikro-geometrie řezného břitu IN04S.....	43
6.1.2 Analýza naměřených hodnot - řezné síly	45
6.1.3 Analýza naměřených hodnot - opotřebení	50
6.1.4 Analýza naměřených hodnot - drsnost obrobeného povrchu	52
6.1.5 Analýza tvaru třísky	54
6.1.6 Shrnutí dosažených výsledků pro originální VBD IN04S.....	56
6.2 TEST ŘEZIVOSTI UPRAVENÉ VBD S PROMĚNNÝM POLOMĚREM ZAOBLENÍ OSTŘÍ (r_n).....	57
6.2.1 Tloušťka odřezávané vrstvy vs. poloměr zaoblení ostří	57
6.2.2 Analýza mikro-geometrie upravených VBD na požadované r_n	60
6.2.3 Analýza naměřených hodnot - řezné síly v závislosti na r_n	62
6.2.4 Analýza naměřených hodnot - opotřebení řezného nástroje v závislosti na r_n	66
6.2.5 Analýza naměřených hodnot - drsnost obrobeného povrchu v závislosti na r_n	68
6.2.6 Analýza tvaru třísky v závislosti na r_n	70
6.2.7 Shrnutí dosažených výsledků v závislosti na r_n	71
6.3 TESTY ŘEZIVOSTI UPRAVENÉ VBD S PROMĚNNÝM FAKTOREM SYMETRIČNOSTI K.....	73
6.3.1 Analýza naměřených hodnot - řezné síly pro proměnné K.....	75
6.3.2 Analýza naměřených hodnot - drsnost obrobeného povrchu pro proměnné K	77
6.3.3 Analýza naměřených hodnot - opotřebení řezného nástroje s proměnným K.....	79
6.3.4 Shrnutí dosažených výsledků pro proměnné K.....	80
6.4 DODATEK K EXPERIMENTÁLNÍ ČINNOSTI ZAMĚŘENÉ NA ZVYŠOVÁNÍ ŘEZIVOSTI NÁSTROJE	81

7.	CELKOVÉ SHRNU TÍ, DISKUZE VÝSLEDKŮ A ZÁVĚR.....	82
7.1	SHRNU TÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	82
7.1.1	Vliv r_n na řezivost nástroje.....	82
7.1.2	Vliv K na řezivost nástroje.....	83
7.1.3	Porovnání dosažených výsledků pro $K \approx 1$ a $K \neq 1$	84
7.2	ZÁVĚR.....	85
8.	POUŽITÁ LITERATURA	86
9.	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	93
	PŘÍLOHY K DISERTAČNÍ PRÁCI.....	96

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Popis
AISI	USA norma
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý
CBN	Kubický nitrid bóru
CNC	Computer numeric control – počítačový řídicí systém
CO ₂	Oxid uhličitý
ČSN EN ISO	Harmonizovaná Evropská norma
DLC	Diamond Like Carbon (PVD vrstva)
EDM	Elektroerozivní obrábění (Electro Discharge Machining)
HAZ	Tepelně ovlivněná oblast (Heat Affected Zone)
HB	Tvrdost podle Brinella
HSM	High speed machining – vysokorychlostní obrábění
HSS	Rychlořezná ocel (High Speed Steel)
HV	Tvrdost podle Vickerse
IFM G4	Opticko-skenovací mikroskop od společnosti Alicona
IN2004	Obchodní označení řezného materiálu (deponovaný vrstvou TiAlN)
IN04S	Obchodní označení řezného materiálu (bez depozice)
K10 – K20	Druh karbidu
MP	Mokrý pískování
M ₂₃ C ₆	Komplexní karbidy
M-S	Matematicko-statistická (analýza)
P _α	Separční bod na hřbetě
Nd: YVO ₄	Typ laseru (pevnotlátkový krystalový laser)
P _γ	Separční bod na čele
PCD	Polykrystalický diamant
PM-HSS	Spékaná rychlořezná ocel
P22	Obchodní označení feriticko-austenitické korozivzdorné oceli
P91	Obchodní označení oceli EN ISO X12CrMoVNbN9-1
RN	Referenční nástroj
S	Stagnační bod
SEM	Řádkovací elektronový mikroskop (Scanning Electron Microscope)
SiC	Karbid křemíku
SK	Slinutý karbid
SP	Suché pískování
TiAlN	Titan aluminium nitrid
TiN	Nitrid titanu
VBD	Vyměnitelná břitová destička
VO	Vlečné omílání
W.Nr.	Značení oceli dle německé normy
WC-Co	Tungsten Carbide Cobalt
X, Y, Z	Kartézská soustava souřadnic
YDA323L101	Označení vyměnitelných břitových destiček
x _i	Nalezený výsledek
μ	Skutečná hodnota
3D	Trojrozměrný nebo trojdimenzionální
6F2B	Označení frézovací hlavy

Symbol a značka	Jednotka	Popis
a_e	[mm]	Radiální hloubka řezu
a_p	[mm]	Axiální hloubka řezu
a_{st}	[°]	Úhel tryskání
A_i	[mm ²]	Odstraněná vrstva
A_t	[mm ²]	Teoretický průřez odřezávané vrstvy
$A_{\theta,i}$	[mm ²]	Plocha roviny kluzu
A5	[%]	Tažnost
b_s	[mm]	Délka ostří
f_{ot}	[mm]	Otáčkový posuv
c_f	[-]	Konstanta (platí pro řezné síly)
f_p	[kHz]	Frekvence pulzů
f_z	[mm]	Posuv na zub
F	[N]	Celkové silové zatížení
F_x, F_y, F_z	[N]	Složky řezných sil ve směru os x, y a z
F_c	[N]	Řezná síla
F_{cn}, F_p	[N]	Pasivní řezná síla
F_f	[N]	Síla ve směru posuvu
F_n	[N]	Normálová síla
F_s	[N]	Smyková síla
H	[%]	Faktor překrytí scanů
h	[mm]	Tloušťka odřezávané vrstvy
h_m	[mm]	Střední tloušťka odřezávané vrstvy
h_s	[mm]	Tloušťka zatlačované vrstvy
I	[GW/cm ²]	Výkon laseru na jednotku plochy
I_{ea}	[GW/cm ²]	Prahová hodnota intenzity laserového paprsku
K	[-]	Faktor symetričnosti ostří
KB	[μm]	Opotřebenění na čele nástroje
KB_{krit}	[μm]	Kriteriální hodnota opotřebenění na čele nástroje
KV	[J]	Vrubová houževnatost
k_c	[MPa]	Měrný řezný odpor
l_t	[mm]	Měřená délka drsnosti
l_α	[mm]	Kontaktní délka na hřbetě (efektivní délka na hřbetě)
l_γ	[mm]	Kontaktní délka na čele (efektivní délka na čele)
L	[mm]	Délka ostří
m_c	[g]	Hmotnost třísky
m_{ct}	[g]	Teoretická hmotnost třísky
n	[min ⁻¹]	Otáčky nástroje
Q_c	[W]	Celkové množství tepla za časovou jednotku
Sa	[μm]	Průměrná aritmetická úchylka základní plochy
Sz	[μm]	Výška povrchu z 10-ti bodů základní plochy
S_α	[mm]	Část břítu na hřbetě
S_γ	[mm]	Část břítu na čele
S_p	[%]	Faktor překrytí pulzů
Ra, Rz	[μm]	Parametr hodnocení drsnosti obrobeného povrchu
r_ϵ	[mm]	Poloměr špičky
r_n	[μm]	Poloměr zaoblání ostří
Rm	[MPa]	Mez pevnosti

$Rp_{0,2}$	[MPa]	Mez kluzu
R_s	[μm]	Drsnost na ostří
R_{sa}, R_{sz}	[μm]	Drsnost na ostří
t	[mm]	Skutečná tloušťka odřezávané vrstvy
t_c	[mm]	Tloušťka třísky
t_t	[mm]	Teoretická tloušťka odřezávané vrstvy
t_{x1}	[mm]	Skutečná tloušťka odřezávané vrstvy ve vazbě na r_n nebo K
T	[min]	Trvanlivost
V	[cm^3]	Objem odebraného materiálu
VB_{\max}	[μm]	Opatření na hřbetě nástroje
VB_{\max_krit}	[μm]	Kritická hodnota opotřebení na hřbetě nástroje
v_c	[m/min]	Řezná rychlost
v_f	[mm/min]	Posuvová rychlost
V_t	[μm^3]	Objem odebraného materiálu z řezného břitu
Z	[%]	Kontrakce
α	[$^\circ$]	Úhel hřbetu
α_s	[$^\circ$]	Úhel dělení materiálu
β	[$^\circ$]	Úhel břitu
γ	[$^\circ$]	Úhel čela
$-\gamma_i$	[$^\circ$]	Negativní efektivní úhel čela plošky na ostří
$-\gamma_{K=x}$	[$^\circ$]	Negativní efektivní úhel čela ve vazbě na K
γ_{eff}	[$^\circ$]	Efektivní úhel čela
Δr	[mm]	Stupeň zploštění
θ	[$^\circ$]	Úhel kluzu
κ_r	[$^\circ$]	Úhel nastavení hlavního ostří
κ_r'	[$^\circ$]	Úhel nastavení vedlejšího ostří
λ_s	[$^\circ$]	Úhel sklonu ostří
$\lambda_{0,2\%C}$	[W/mK]	Tepelná vodivost oceli s obsahem uhlíku 0,2%
$\lambda_{1.4903}$	[W/mK]	Tepelná vodivost oceli 1.4903
π	[rad]	Matematická konstanta, oblouková míra kruhu
ρ	[g/cm ³]	Hustota materiálu
τ_s	[MPa]	Smykové napětí
φ	[$^\circ$]	Úhel sklonu úpravy ostří
φ_i	[$^\circ$]	Úhel záběru
φ_{\max}	[$^\circ$]	Maximální úhel záběru

1. ÚVOD

V každé průmyslové výrobě je požadována vysoká produktivita a zvláště vysoká spolehlivost výrobního procesu. Tyto požadavky je možné ovlivnit řezivostí nástroje. Řezivost lze charakterizovat jako souhrn vlastností, které komplexně ovlivňují výkonnost řezného nástroje. Jako jeden z mnoha ovlivňujících faktorů je mikro-geometrie řezného břitu. Pískování, kartáčování, vlečné omílání, magnetické leštění, elektro-erozivní stejně tak laserové obrábění jsou v současné době nejpoužívanější technologie k úpravě mikro-geometrie řezného břitu. Každá z těchto metod úprav má svou oblast aplikace a je charakteristická svou produktivitou, opakovatelností a flexibilitou v rámci velikosti a tvaru požadované úpravy. Výsledná mikro-geometrie řezného břitu má vliv na řezné síly, rozložení tepla, opotřebení nástroje a s tím související trvanlivost či životnost, drsnost obrobeneho povrchu, zbytková napětí, stabilitu řezného procesu apod.[1] a [2]

Mikro-geometrie řezného břitu ovlivňuje termo-mechanické zatížení řezného břitu. Již v roce 1960 byl prvně popsán její vliv na mechaniku tvoření třísky. Vytvořením vhodného tvaru ostří, ve formě zaoblení, pomocí některých z výše uvedených úprav, se stabilizuje řezný břit, což má pozitivní vliv na snížení intenzity opotřebení a tím dosažení vyšší trvanlivosti řezného břitu. V posledních letech se vývoj v oblasti řezných nástrojů soustředil především do oblasti materiálů, jejich slinování a depozičních technologií. Výrobci řezných nástrojů jsou v současné době schopni produkovat široké spektrum deponovaných nástrojů se specializovanými makro-geometriemi a vlastnostmi substrátů. Trend využívající speciální konstrukce mikro-geometrie je relativně nový a velmi aktuální ve srovnání s dlouhou historií vývoje nástrojů. [2] a [3]

Volba „vhodné či optimální“ mikro-geometrie řezného břitu stále představuje problém, a proto patří mezi hlavní směry výzkumu a vývoje v dané oblasti. Pro úpravu řezného břitu jsou obvykle použity abrazivní nebo termické technologie úprav. Tyto úpravy jsou používány jak před, tak po depozici nástrojů. Před-depoziční úpravy jsou používány především k získání kompaktní geometrie, kdy jsou z řezného břitu odstraněny nedostatky vzniklé broušením (otřepy a mikro-vylomeniny). Dále je pozitivně ovlivněna topografie povrchu řezného břitu, tzn. zvětšení adheze a kvality deponované vrstvy. Všechny před- a po- depoziční úpravy vedou k vyšší mechanické stabilitě řezného břitu a jsou **uměním (technickým know-how)** téměř každého výrobce nástrojů. V roce 2000 byla provedena studie, která prokázala, že 10 ÷ 14% výrobních nákladů je investováno do úprav ostří. [3]

Řezné břity jsou v současnosti upravovány tak, aby ostří bylo kruhového tvaru s poloměrem v řádu mikrometrů. [4]

Úprava řezného břitu si klade za cíl zlepšit výkonnost nástroje pomocí zvýšení stability řezného ostří. Úpravou řezného břitu se vytvoří definované zaoblení ostří. Ostří před samotnou úpravou obsahuje defekty (mikro-vylomeniny a otřepy). Mikro-vylomeniny ostří nesou parametr ***R_s*** a tento parametr představuje drsnost podél řezného břitu. Zároveň je to faktor, který respektuje mikroskopickou kvalitu. Jednotlivé úpravy mikro-geometrie řezného břitu mají výrazný vliv na hodnotu ***R_s***. [5]

Během obrábění hrají důležitou roli materiálové vlastnosti jak obrobku, tak řezného břitu, parametry obrábění a funkční parametry břitu jako je ostrost a kontura ostří, které přímo ovlivňují trvanlivost nástroje a tím kvalitu obrobené plochy. Pro dosažení optimální trvanlivosti a výkonu obrábění je vyžadováno optimalizovat rysy řezného břitu. Jeden z nejdůležitějších rysů je již zmiňovaná ostrost. Dokonale ostrý řezný břit neexistuje, vybroušený řezný břit obsahuje spoustu defektů, a proto se používá úprav řezného břitu, které zvyšují stabilitu řezné hrany. Úprava mikro-geometrie řezného břitu je proces přeměny geometrie ostří na sražený nebo zaoblený tvar. Velikost a tvar zaoblení je charakterizován použitím parametrů S_ω , S_γ , r_n a K . [6] Ostré řezné břity, s poloměrem zaoblení $r_n < 5 \mu\text{m}$, jsou vyráběny broušením. Broušení je také použito pro komplexní úpravu geometrie, sražení a pro odstranění většího množství materiálu řezného břitu. Střední poloměry zaoblení ostří $5 \mu\text{m} < r_n < 20 \mu\text{m}$ mohou být připraveny vlečným omíláním, pískováním, magnetickým leštěním, elektro-erozivním nebo laserovým obráběním. Kartáčováním jsou připravovány poloměry zaoblení $r_n > 20 \mu\text{m}$. Samotné broušení také umožňuje výrobu rovnoměrné mikro-geometrie. Na rozdíl od výše zmiňovaných technologií úprav, parametry broušení ovlivňují kvalitu ostří. [7]

Nejpoužívanějšími technologiemi úpravy jsou kartáčování a pískování. Obě dvě technologie však nejsou vhodné pro úpravu CBN a PCD nástrojů díky tvrdosti materiálu substrátu. Proto se pro úpravu těchto nástrojů využívají nekonvenční technologie, jako EDM. [8] Lomová houževnatost CBN nástroje (stejně tak i řezné keramiky) je přibližně poloviční ve srovnání se slinutým karbidem, proto se sražení, ale i zaoblení ostří stalo základním způsobem úpravy. [9]

Optimální poloměr zaoblení ostří je závislý na obráběném materiálu, řezném materiálu a řezných podmínkách. Řezné síly, které během procesu obrábění vznikají, jsou součtem sil působících na řezný břit (hřbet, čelo a ostří). [10]

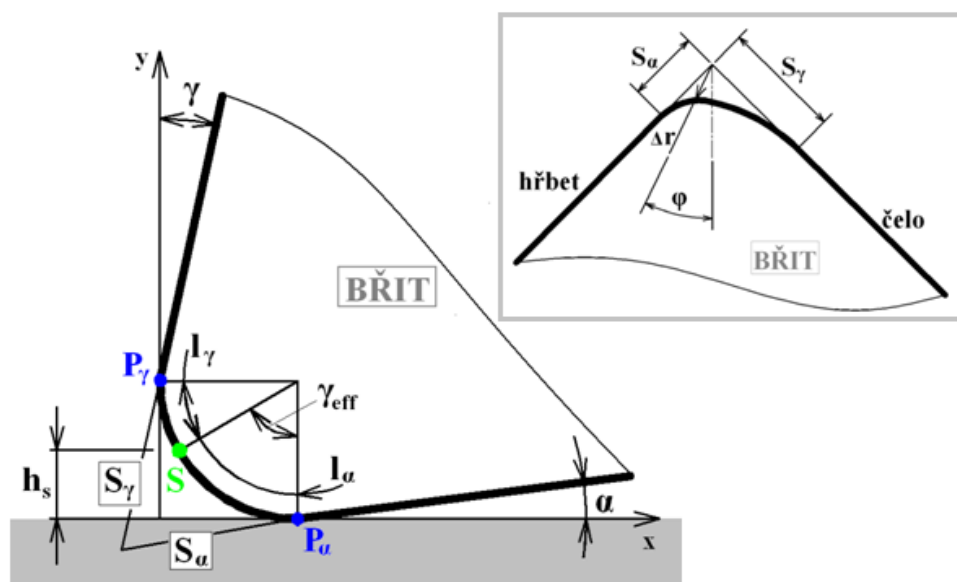
Trendem poslední doby je depozice nástrojů, avšak je dobře známo, že depozice mění mikro-geometrii břitu, což samozřejmě ovlivní poloměr zaoblení ostří, drsnost funkčních ploch nástroje atd. Depozice nástroje způsobuje nejen napětí mezi substrátem a deponovanou vrstvou, ale také nese reálné stopy depoziční technologie, jako jsou efektivní poloměr zaoblení ostří, mikro-trhliny, tvarová integrita břitu atd. [9]

2. GEOMETRIE A MIKRO-GEOMETRIE BŘITU

K analýze vlivu mikro-geometrie řezného břitu na výkon řezného nástroje je potřeba znát konstrukci samotné mikro-geometrie¹. *Denkena a kolektiv* [11] ve své práci představili metodu popisu upraveného řezného břitu založenou na definici čtyř základních parametrů, které jsou znázorněny v *obr. 2 - 1*. Těmito parametry jsou: S_ω , S_γ , Δr , φ , a to jak pro symetricky, tak asymetricky upravené ostří. [11]

$$\text{Poměr } K = \frac{S_\gamma}{S_\alpha}$$

(nazývaný jako faktor symetričnosti ostří) popisuje směr spádu profilu směrem k čelu ($K > 1$) nebo k hřbetu ($K < 1$). Tento algoritmus může být aplikován pro data naměřená dotykovými, optickými a SEM měřicími zařízeními. [3]



Obr. 2 - 1: Charakteristika řezného břitu [1]

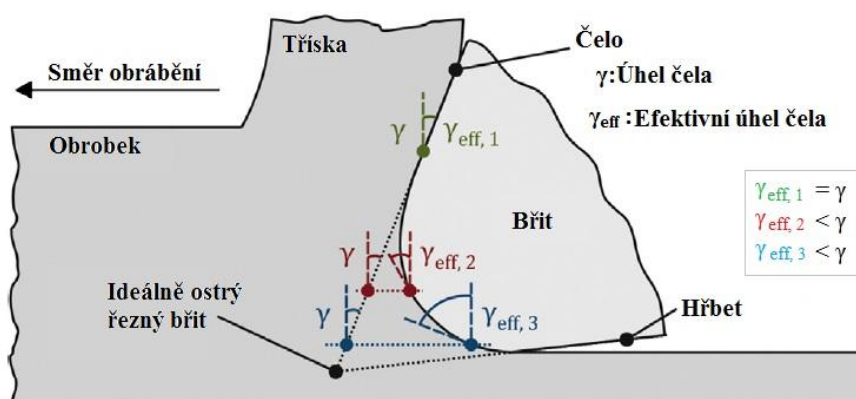
K vysvětlení řezného výkonu nástroje s upraveným ostřím je nejdříve nutné přesně popsat upravený řezný břit. Popis bude proveden dle *obr. 2- 1*. *Denkena a kolektiv* [2] navrhli charakteristiku geometrie ostří s ohledem na virtuální špičku nástroje odvozenou z lineárního protažení plochy hřbetu a čela nástroje. První charakteristický bod P_α se nalézá na hřbetě nástroje a představuje na něm první bod, který se dostává do kontaktu s obrobeným povrchem. Druhým charakteristickým bodem je stagnační bod S , který je definován efektivním úhlem čela γ_{eff} . Z dostupných zdrojů [12] a [13] se γ_{eff} pohybuje v rozmezí $52 \div 65^\circ$. Třetím charakteristickým bodem je P_γ , který tvoří přechod mezi ostřím a čelem nástroje. Od tohoto bodu zůstává úhel čela konstantní (dle makro-geometrie nástroje).

¹ Standardní rozměry nástroje jsou popsány makro-geometrií, mikro-geometrie popisuje geometrické detaily aktivní části řezného nástroje [15]

Velikost l_γ (mezi P_γ a S) má vliv na mechanismus vzniku třísky, a to v důsledku vysokého negativního efektivního úhlu čela, viz obr. 2 - 2. Velikost l_α má vliv na tření mezi upraveným ostřím a obrobenou plochou, tzn. na řezné síly a integritu obrobeného povrchu. [13] Jakákoliv asymetrie je popsána poměrem vzdáleností S_α a S_γ od bodů P_α a P_γ , viz faktor symetričnosti ostří K . Stupeň zploštění je popsán parametrem Δr , který je dán vzdáleností od virtuální špičky k nejvyššímu vrcholu profilu ostří. Nízké hodnoty Δr vyjadřují ostré ostří a naopak vysoké hodnoty Δr znamenají, že rádius se podobá spíše sražení. Parametr φ určuje úhel sklonu úpravy a jedná se o úhel mezi čelem a Δr vyjadřující umístění nejvyššího bodu ostří. [2] a [7] R_s určuje kvalitu řezného břitu, lze ho popsat jako vydrolování ostří, které může být zapříčiněno např. vylomením/zlomením zrn na ostří během výrobního procesu. [7] Samotný poloměr zaoblení ostří vytváří přechod mezi hřbetem a čelem nástroje. Jelikož je měřen v rovině normálové, je označován jako r_n . [14]

Vztah pro objem odebraného materiálu z řezného břitu (pro případ dokonale ostrého řezného břitu):

$$V_t = r_n^2 \left[\cot g \left(\frac{\beta}{2} \right) - \left(\frac{\pi - \beta}{2} \right) \right] \quad (R. 1)$$



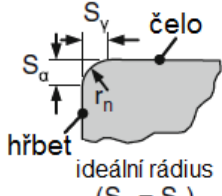
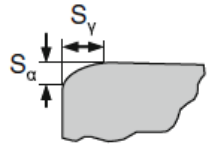
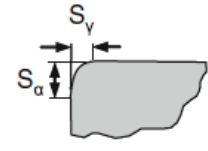
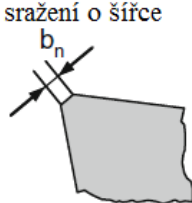
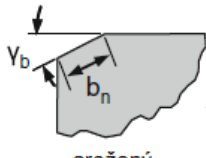
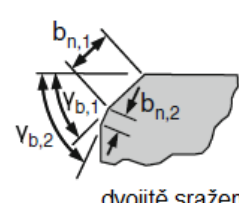


Obr. 2 - 2: Efektivní úhel čela [15]

Většina metod úpravy ostří je založena na principu působení abrazivních částic, jejichž účinek je zprostředkován vhodným médiem. Tímto médiem může být např. vzduch, pasta, pojivo, vlákno apod. Výsledné požadované zaoblení řezného ostří je vytvořeno kombinací příslušné rychlosti a doby pohybu abraziva nebo nástroje. Úpravy ostří jsou prováděny z následujících důvodů:

- snížení měrného tlaku,
- snížení tření a tím snížení řezné teploty,
- snížení drsnosti na ostří,
- zvýšení pevnosti řezného ostří,
- zvýšení trvanlivosti nástroje,
- minimalizace sklonu ostří k vydrolování,
- příprava povrchu řezného břitu na depozici,
- vytvoření definovaného tvaru a rozměru ostří. [16] a [17]

V obr. 2 - 3 jsou znázorněny základní úpravy řezného ostří a jejich varianty. Tyto úpravy jsou používány v proměnných velikostech v závislosti na velikosti řezného nástroje a jeho použití.

Základní úpravy ostří a jejich varianty			
 Ostrý řezný břit			
poloměr zaoblení ostří r_n  Zaoblený řezný břit	 čelo hřbet ideální rádius ($S_a = S_v$)	 trumpet tvar ($S_a < S_v$)	 waterfall tvar ($S_a > S_v$)
sražení o šířce b_n  Sražený řezný břit	 sražený	 dvojitě sražený	

Obr. 2 - 3: Základní úpravy řezného ostří a jejich varianty [14] a [18]

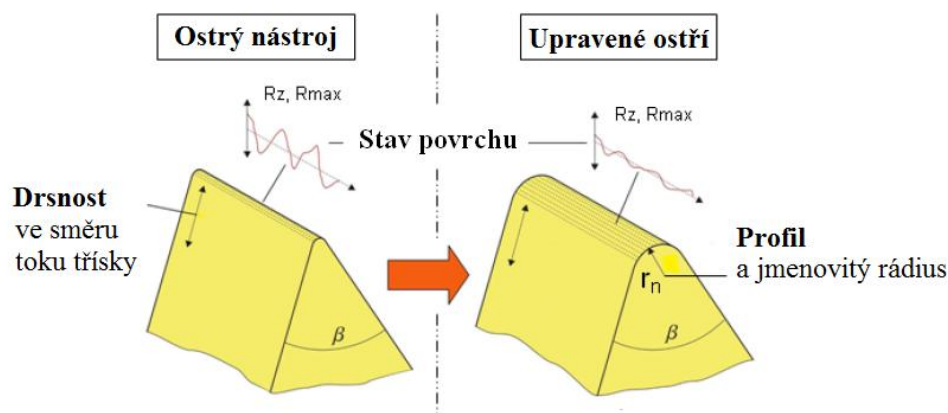
Technologie obrábění určuje způsob úpravy řezného ostří. **Sražení řezného ostří** se provádí na nástrojích určených pro tvrdé soustružení, hrubovací obrábění, těžké přerušované řezy a celkově u operací, kde je vyžadována vyšší pevnost řezného břitu. Je prováděno na nástrojích z řezné keramiky, kubického nitridu boru a polykrystalického kubického nitridu boru. Výrobci nástrojů obvykle dodávají nástroje se sražením $0,1 \times 20^\circ$, nazývané jako T-land. Malá negativní sražení řezného břitu mohou snížit možnost náhodného poškození břitu, prospívají rozptýlení tepla a lepší distribuci napětí. **Zaoblení řezného ostří** se provádí pro před-dokončovací, dokončovací, jemné a mikro-obrábění. Zaoblené řezné ostří lze nalézt na nástrojích HSS, SK, cermety, diamant. Zaoblené řezné ostří redukuje iniciaci vrubového opotřebení. **Kaskádovitá** úprava ostří kombinuje příslušné charakteristiky sraženého a zaobleného ostří, jako jsou zvýšení pevnosti špičky nástroje a zvýšení úhlu čela. Její oválná geometrie zjednodušuje odvod třísky z místa řezu. [18]

Úprava řezného břitu musí být pečlivě vybrána pro danou aplikaci obrábění, neboť ovlivňuje integritu obrobeného povrchu. Teplo vznikající při tvrdém soustružení je také ovlivněno samotnou úpravou řezného břitu. Např. sražení ostří zapříčiňuje silně negativní úhel čela a má za následek vysoké řezné teploty. [19]

2.1 VÝZNAM ÚPRAVY OSTŘÍ

Na obr. 2 - 4 je znázorněn rozdíl mezi ostrým nástrojem a nástrojem s upraveným ostřím. Levá část vyjadřuje ostrý řezný břit, který vznikl vybroušením plochy čela a hřbetu nástroje. Samotné ostří má určitý poloměr zaoblění, což vyplývá z podmínky, že nelze vyrobit dokonale ostrý nástroj. [20] Drsnost povrchu tohoto ostří dosahuje vyšších hodnot a může obsahovat následující defekty:

- Mikro-defekty: jsou důsledkem procesu broušení a manipulace mezi každým krokem výrobního procesu. Mikro-defekty se mohou objevit jak před, tak po fázi depozice.
- Otřepy: jsou taktéž způsobeny procesem broušení. Otřep se v průběhu obrábění může přehrnout přes řeznou hranu a způsobit tak její poškození. Naprostou nezbytností pro depoziční proces je nástroj bez otřepů. [21]

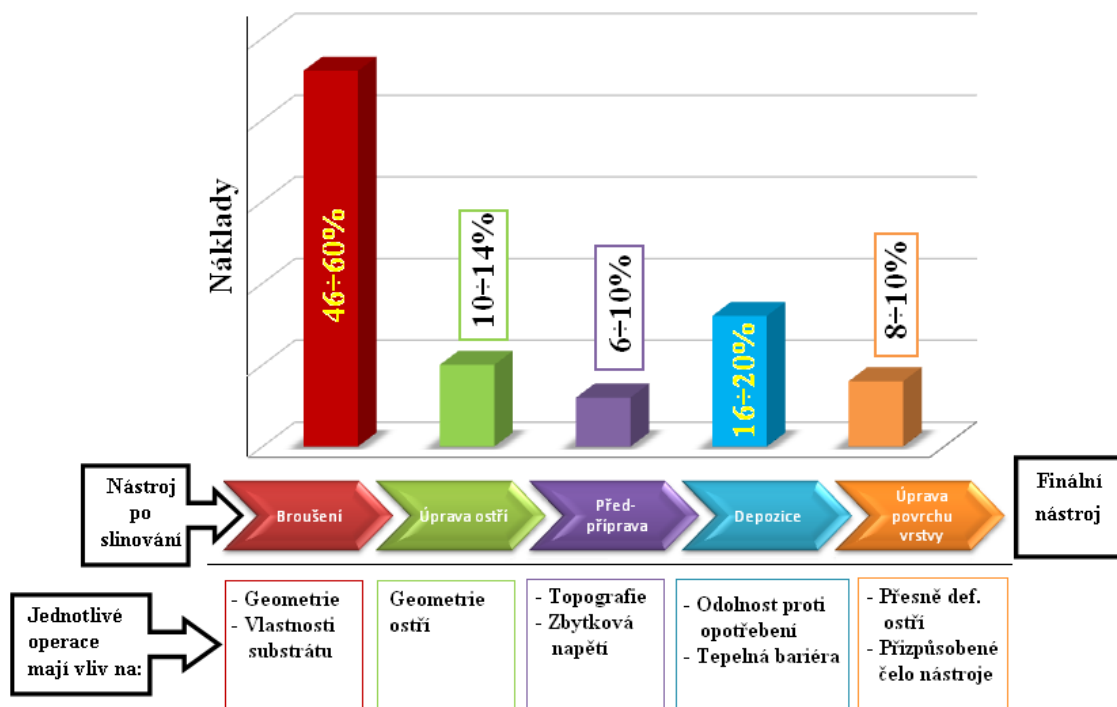


Obr. 2 - 4: Charakteristika úpravy ostří [21]

V úvodu této kapitoly bylo zmíněno, že vybroušené řezné ostří je „nedokonalé“, což může způsobit jeho vydrolování, trhliny a lomy. Nástroj po úpravě mikro-geometrie eliminuje zmiňované nedostatky a má příznivý vliv na:

- řezné síly/kroučící moment,
- řezné teploty,
- opotřebení a s tím související trvanlivost nástroje,
- utváření třísky,
- kvalitu obrobeneho povrchu,
- přesnost obrábění,
- přilnavost deponované vrstvy,
- apod.

Povrch ostří má již menší drsnost a koncentrace napětí je minimalizovaná. Vhodný návrh geometrie řezného břitu ovlivňuje nejen výše specifikované parametry procesu obrábění, ale též tvar deformačních zón a distribuci teplot a tlaků na čele nástroje. Nevhodně zvolená úprava ostří může způsobit podpovrchová poškození a také mít za následek vysoká tahová zbytková napětí na obrobeneho povrchu. Proto návrh mikro-geometrie břitu musí být v souladu s danou aplikací použití. [22] a [23]



Obr. 2 - 5: Výrobní proces nástrojů vyrobených práškovou metalurgií [24]

V průběhu výroby nástroje je důležité sledovat nejen vliv jednotlivých technologií, ale také různých mezioperačních úprav, neboť právě všechny tyto faktory mají zásadní vliv na trvanlivost řezného nástroje, tudíž na úspěch deponované vrstvy. Výrobní proces nástroje, který je produktem práškové metalurgie, je znázorněn na obr. 2 - 5. Prvním krokem je broušení funkčních ploch nástroje, případně vybroušení dosedací a obvodové plochy na VBD. Tento proces je nejnáročnější, neboť dle zdroje [24] představuje $46 \div 60$ % nákladů. Poté následuje proces úpravy bříty. Dalším krokem je úprava nástrojů před depozicí. Tato před-příprava si klade za cíl odstranit nečistoty z povrchu nástroje a zvýšit adhezi vrstev. Dále následuje proces depozice a na závěr je provedena úprava povrchu vrstvy, jejímž úkolem je snížit drsnost vrstvy. [24] a [25]

3. TECHNOLOGIE ÚPRAVY MIKRO-GEOMETRIE BŘITU

3.1 KARTÁČOVÁNÍ

Jedná se o úpravu mikro-geometrie řezného břitu pomocí rotujícího nástroje. Vlákná kartáče jsou tvořena buď přírodním, nebo umělým materiálem. Přírodní vlákna jsou vyrobena z žíní nebo rýžových kořínků a pro proces kartáčování je nezbytné použít brusnou pastu. Umělá vlákna jsou vyrobena z polymerního materiálu a jsou vyplněna abrazivními částicemi jako např. SiC, Al₂O₃, CBN nebo PCD. [26] Abrazivní částice obvykle tvoří 30 ÷ 40% podíl objemu vláken. Dle [3] polyamidová vlákna s SiC částicemi pracují za teplot v rozsahu 80 ÷ 100°C. Deformace a teplota tavení těchto vláken nastává při teplotě 140 ÷ 255 °C. Důležitými procesními parametry jsou rychlost kartáčování v_c [m/s] a přísuv a_e [mm]. Dalšími sledovanými parametry jsou posuvová rychlost v_f [mm/min], čas [s] a počet opakování. [27], [28] a [29] Nesprávně nastavené parametry mohou zapříčinit:

- vznik nesprávného tvaru profilu ostří, což nastává v případě vysokých hodnot přísuvu, které způsobí „zploštění“ profilu vyrobeného ostří,
- zničení brusného kartáče (poničení vláken kartáče) je zapříčiněno nastavením nízkého přísuvu. Nízký přísuv znamená menší objem odebraného materiálu z ostří a tím pádem navýšení času kartáčování, které zapříčiňuje vyšší procesní teploty. [3] a [28]

Tvar vyrobeného profilu ostří je dán směrem kartáčování. Kartáčovat lze:

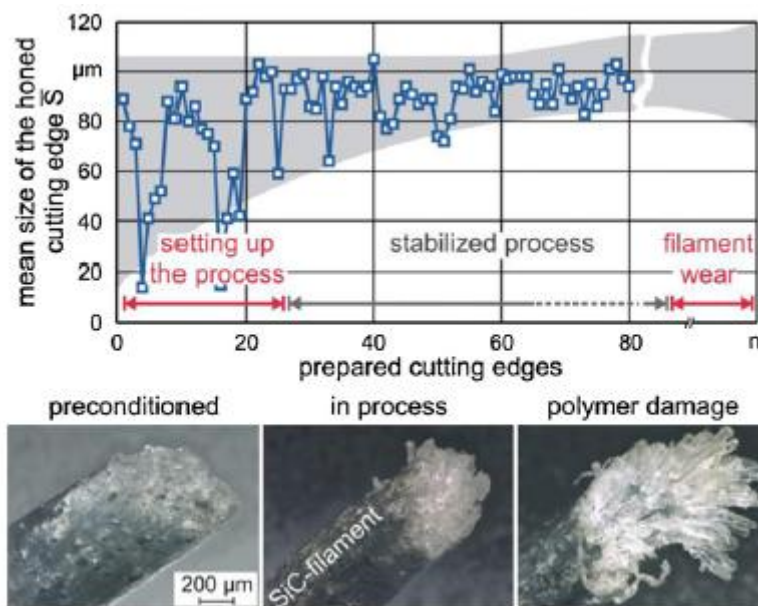
- z jedné strany – ve směru od čela k hřbetu nebo naopak,
- dvousměrné kartáčování (kombinace obou směrů).

Jednosměrné kartáčování je obvykle používáno pro výrobu malých a symetricky upravovaných ostří. Naopak k výrobě větších poloměrů zaoblení ostří je používáno dvousměrné kartáčování. [3]



Obr. 3 - 1: a) Ilustrativní obrázek kartáčování [30]; b) detail kartáče [27]

Vlákná kartáče se během procesu kartáčování opotřebovávají, tzn. jejich stav je potřeba kontrolovat. V obr. 3 - 2 jsou znázorněna tři stadia stavu opotřebení vláken. V první fázi, kdy dochází k nastavování procesu kartáčování, vlákna odebírají velký objem materiálu z břitu a dochází k problémům se stabilizací procesu úpravy. V druhé fázi je již proces stabilizován a dochází k získávání požadovaných rozměrů upravovaného ostří a adekvátní opakovatelnosti. Třetí fáze představuje poničená/opotřebovaná vlákna kartáče. V tomto případě je nutné buď kartáč vyměnit za nový nebo kartáč obnovit/přeostřit. [3] a [27]



Obr. 3 - 2: Jednotlivé stavy opotřebení vláken kartáče [3]

Výhody:

- jednoduchý proces
- opakovatelnost
- možnost leštění povrchu
- vytvoření různých geometrií

Omezení:

- nutnost přesného polohování kartáče
- nalepování materiálu vláken na břit nástroje

Modifikací procesu kartáčování je leštění. Při leštění jsou využívány neabrazivní štětiny a úběr materiálu z řezného břitu je realizován pomocí brusné pasty. Nástrojem je obvykle měkký kartáč s vlákny, která jsou vyrobena z přírodních žíní nebo polymerů. Brusná pasta často obsahuje mikro-diamantové částice. Výsledek leštění je opět závislý na rychlosti, hloubce penetrace a čase. [15]

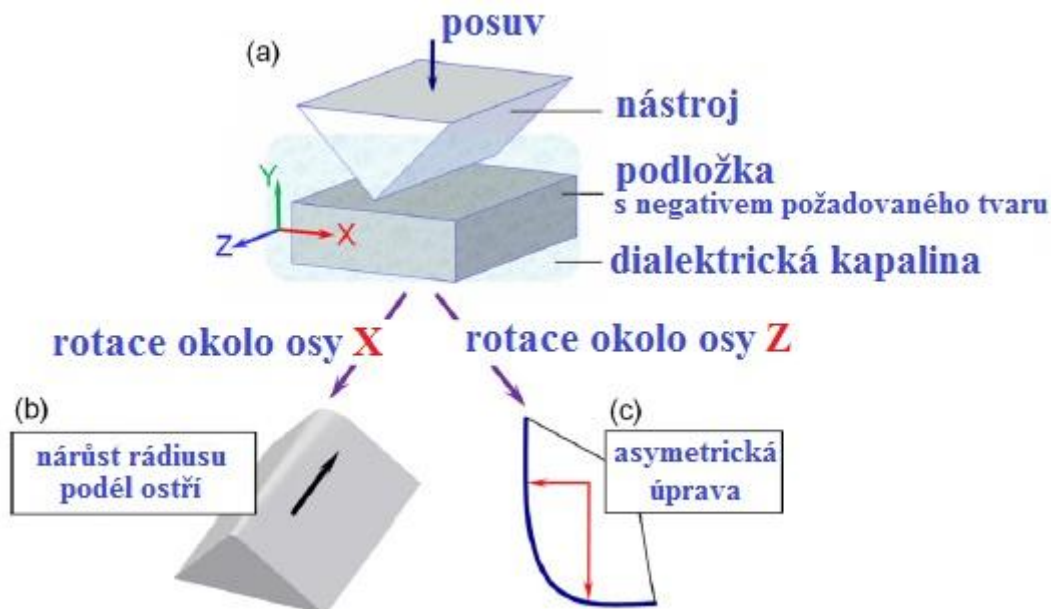
3.2 ELEKRO-EROZIVNÍ ÚPRAVA OSTŘÍ

Jedná se o klasický způsob elektro-erozivního obrábění. Jelikož je z řezného břitu odstraněn velmi malý objem materiálu, tak se jedná o velmi rychlý proces, který trvá pouze několik sekund. Základem této technologie je nastavení správných EDM parametrů, které zajistí vhodnou integritu povrchu nově vytvořeného řezného břitu. Mezi hlavní výhody se řadí:

- opakovatelnost,
- schopnost upravovat i ultra-tvrdé řezné materiály jako je PCD (samozřejmě s drobnou úpravou, aby byla zajištěna elektrická vodivost, která je pro tento proces nezbytná).

Použití technologie EDM k úpravě ostří je založeno na opakovaném ponořování řezného břitu do podložky, která je negativem požadovaného tvaru. To vše je za přítomnosti

dialektrické kapaliny. Kinematika pohybu zahrnuje rotaci řezného břitu kolem osy X a kolem osy Z , viz *obr. 3-3*. V případě rotace kolem osy X (*obr. 3-3b*), vznikne proměnný/narůstající rádius podél ostří a při rotaci kolem osy Z (*obr. 3-3c*) se vytvoří asymetricky upravené ostří, které je rovnoměrné podél celého ostří. [12]



Obr. 3 - 3: Kinematika EDM úpravy ostří [12]

3.3 VLEČNÉ OMÍLÁNÍ

Nástroje jsou upnuty do speciálního držáku a vlečeny abrazivním médiem za současného rotačního pohybu okolo vlastní osy. Nástroje se pohybují po planetární dráze. To zajišťuje stálý kontakt všech ploch na nástroji s procesním médiem. Důležitými parametry v procesu vlečného omílání jsou procesní čas, rychlost, hloubka ponoření nástrojů do abrazivního média a samotné abrazivní médium, které určuje velikost výsledného poloměru zaoblení ostří a jakost povrchu nástroje. Všechny tyto proměnné parametry lze ovlivnit tak, aby celý proces byl opakovatelný, což je jedna z výhod této technologie. Ovlivňujícími parametry jsou:

- hloubka ponoření nástroje do abrazivního média. Čím těžší jsou zrna procesního média, tím vyšší bude statický tlak. To má za následek větší poloměr zaoblení ostří a příslušně i lepší hladicí schopnost. Hloubka ponoru ovlivňuje velikost měrného tlaku na povrch nástroje.
- rychlost. Rychlost může být plynule proměnná a ovlivňuje velikost r_n , intenzitu a rovnoměrnost omletí. Obecně platí, že vyšší rychlosti mají za následek rychlejší omletí zejména exponovaných hran. Avšak vysoká rychlost nástroje/obrobku vůči médiu nemusí umožnit dostatečné proniknutí média do všech míst obrobku, jako je např. drážka nebo rohové oblasti.
- procesní čas. Ovlivňuje výslednou velikost zaoblení břitu a stav povrchu. Čas omílání může být od několika málo sekund až po desítky minut (např. při 20-ti minutovém omílání nástroje z SK bylo dosaženo $r_n = 70 \mu\text{m}$).

- abrazivní médium. Má vliv na kvalitu povrchu řezného břitu, drážky řezného nástroje a velikost poloměru zaoblení ostří.
- směr rotace držáku nástroje (pravá/levá). Kombinace různých směrů a rychlostí rotace držáku nástroje způsobuje, že médium působí na obrobek v rozdílných místech s rozdílným měrným tlakem a intenzitou brusného nebo leštícího účinku. Dosažení požadovaných výsledků omílání je tedy kombinací správného směru a rychlosti rotace nástroje. [16], [31], [32] a [33]

Tab. 3 - 1: Procesní média [16]

Složení	Zaoblovaná ostří	Leštění
Skořápky vlašských ořechů + SiC	Karbidy (+ HSS)	Standardní vrstvy
Keramika + SiC	Karbidy (+ HSS)	Super-tvrdé vrstvy

Omíláním lze vytvořit definovaný poloměr zaoblení ostří $r_n < 150 \mu\text{m}$. [29]

Výhody:

- spolehlivý proces,
- vysoká opakovatelnost,
- leštění drážek nástroje.

Omezení:

- pevný upínací systém,
- upínací hlava musí být rovnoměrně osazena pro dosažení homogenního opracování ostří. [28]



Obr. 3 - 4: Stroj pro vlečné omílání – OTEC [34]

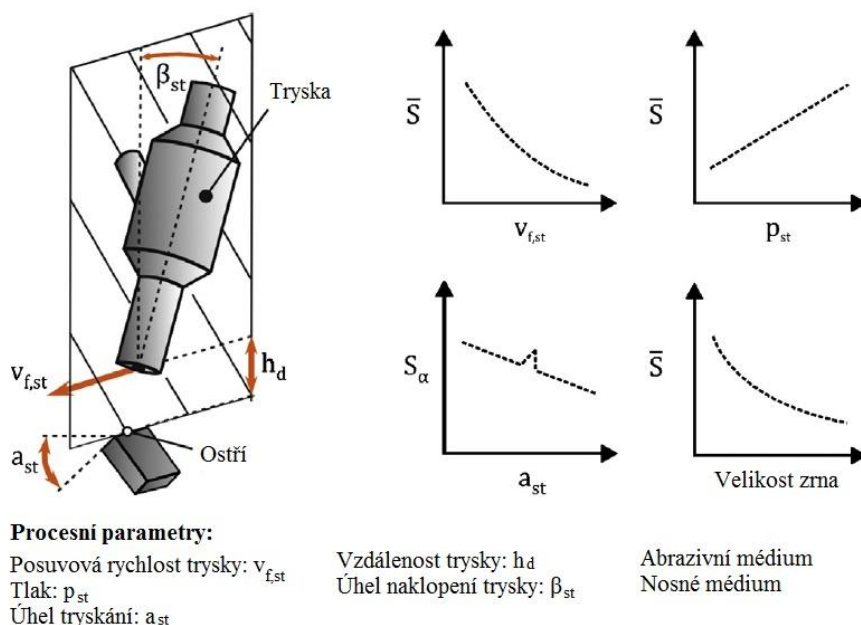
3.4 PÍSKOVÁNÍ

Pískování, taktéž nazývané jako tryskání, je proces úpravy ostří pomocí abrazivních částic, které jsou unášeny buďto vzduchem nebo vodou. Dle použitého nosného média rozlišujeme mokré a suché pískování. Jedná se o málo nákladný proces úpravy ostří, jež má pozitivní vliv na houževnatost a spolehlivost ostří. Řezný materiál je z ostří odebrán již zmiňovanými abrazivními zrny. V případě mokrého pískování je abrazivní médium (nejčastěji se jedná o zrna Al_2O_3) ve vířivé komoře smícháno s vodou a následně akcelerováno skrz trysku směrem k nástroji. Náraz směsi na lokalizovanou část nástroje vede k tvorbě třísek (mikro-třísek) a lokální deformaci.

Integritu upravovaného ostří, během procesu pískování, je možné ovlivnit nastavením vybraných parametrů, mezi něž patří:

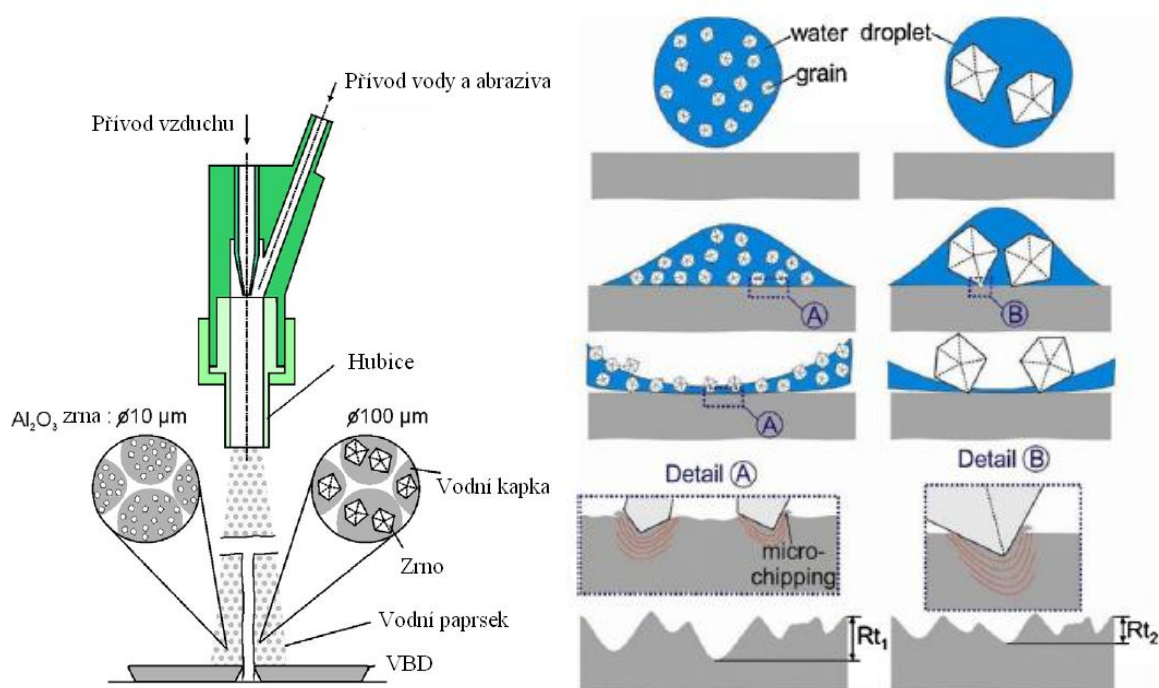
- tlak – má přímý vliv na objem odebraného materiálu z řezného břitu. Při vyšším tlaku je kinetická energie abrazivních zrn vysoká a vede k vyšším hodnotám r_n ,
- posuvová rychlost trysky – vyšší posuvová rychlost vede k menšímu časovému ovlivnění upraveného ostří a ve výsledku k menšímu objemu odebraného materiálu,
- úhel tryskání (a_{st}) – ovlivňuje množství materiálu odebraného z hřbetu nebo čela nástroje, tj. má přímý vliv na S_α a S_γ .

Dalšími ovlivňujícími parametry jsou: vzdálenost trysky od nástroje, úhel naklonění trysky, geometrie trysky, čas tryskání, ale také materiál, velikost a tvar zrn. Schematický přehled výše vyjmenovaných ovlivňujících parametrů a jejich vliv na objem odebraného materiálu z řezného břitu technologií mokrého tryskání je znázorněn v *obr. 3-5*. [5], [15] a [35]



Obr. 3 - 5: Vliv procesních parametrů na \bar{S} nebo S_α při mokřém tryskání [15]

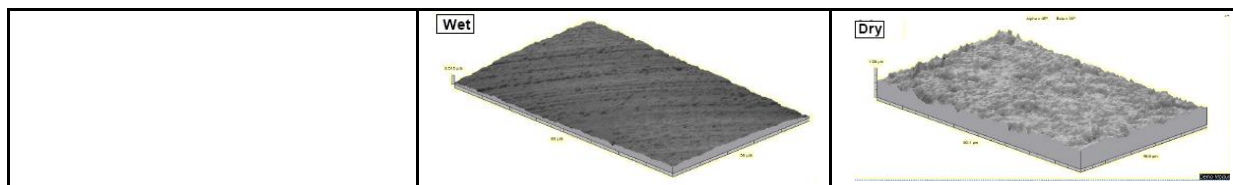
Obr. 3-6 schematicky znázorňuje účinek mokrého tryskání zrn Al_2O_3 o průměrné velikosti $10\ \mu\text{m}$ a $100\ \mu\text{m}$ na integritu deponovaného řezného břítu. Vysoký počet zrn o průměrné velikosti $10\ \mu\text{m}$ zapříčiní mnohem intenzivnější odstraňování vrstvy deponovaného nástroje v porovnání se zrn o velikosti $100\ \mu\text{m}$ za stejný časový okamžik. Ve stejném množství vody je rozptýleno větší množství jemných zrn. Tato zrna po dopadu na povrch nástroje zapříčiňují odebrání deponované vrstvy ve formě mikro-tríšek, zatímco větší zrna deformují deponovanou vrstvu. Tzn., že větší část kinetické energie $100\ \mu\text{m}$ zrn je spotřebována na plastickou deformaci deponované vrstvy v porovnání s menšími zrn. Proto deponované vrstvy upravené mokrou cestou, jemnějšími zrn, mají obvykle vyšší drsnost povrchu a menší nano-tvrdost v porovnání se stejnou technologií, prováděnou za stejných podmínek, ale s většími zrn. [15], [29], [35], [36] a [37] V *tab. 3-2* je provedeno porovnání jednotlivých metod tryskání.



Obr. 3 - 6: a) princip mokrého tryskání [35]; b) účinek velikosti abrazivních zrn na drsnost povrchu deponovaného nástroje při mokrému tryskání [36]

Tab. 3 - 2: Porovnání mokrého a suchého tryskání [28] a [38]

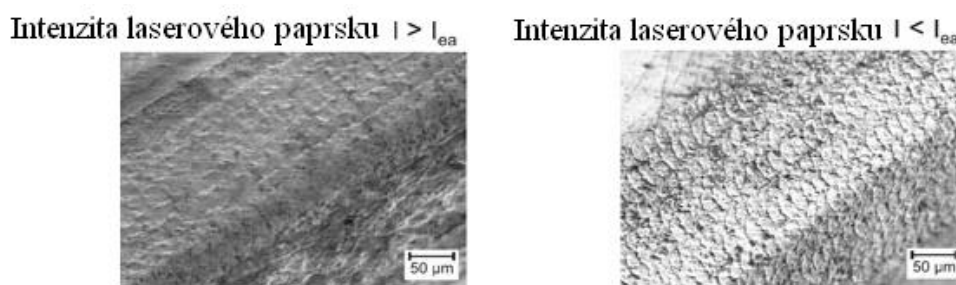
	Mokré	Suché
Plošná drsnost povrchu	$S_a = 0,05\ \mu\text{m}$ $S_z = 0,32\ \mu\text{m}$ Jemně lesklý povrch	$S_a = 0,11\ \mu\text{m}$ $S_z = 1,14\ \mu\text{m}$
Zbytkový materiál po mikro-pískování	Nebezpečí vyloučení kobaltu kvůli vodě	Setrvačnost zbytkového materiálu
Velikost zrn	50 μm – hrubá zrna, pro zaoblení ostří 37 μm – střední zrna, pro aktivaci povrchu 30 μm – jemná zrna, pro leštění	
Čas potřebný pro mikro-pískování odvalovací frézy $\varnothing 80\ \text{mm}$ – $r_n = 10\ \mu\text{m}$	3 min	6 min
Hlavní rysy	Před-čištění není nutné Nutné osušit povrch po mikro-pískování	Před-čištění je nutné Sušení po mikro-pískování není potřeba



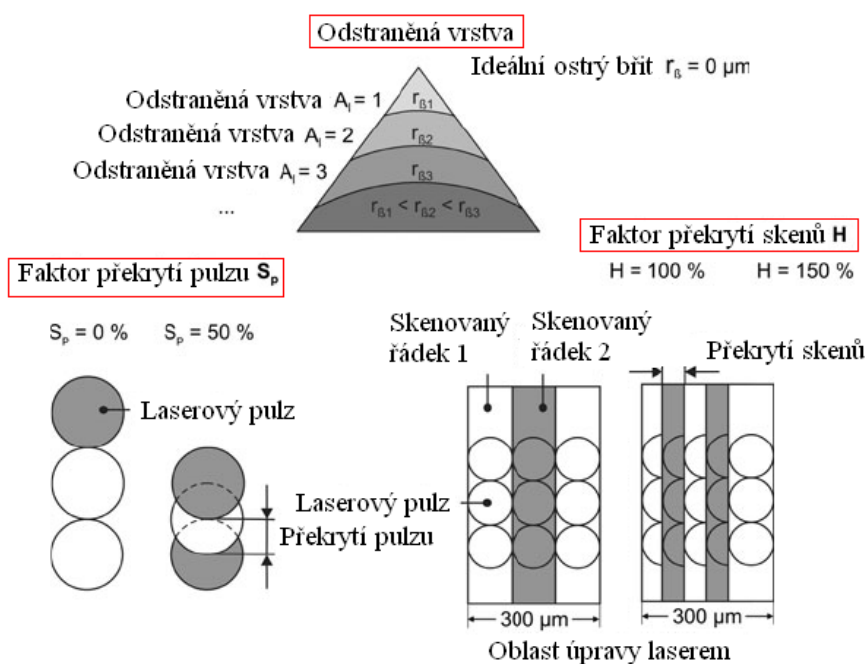
Výsledky pískování se mohou lišit v závislosti na provedení a metodě pískování. Například jisté problémy mohou nastat vlivem nepravidelného proudu abrazivní směsi. Na druhé straně má technologie pískování i řadu výhod, mezi něž je možné zařadit odstranění pojiva a snížení drsnosti podél ostří, což vede k lepší adhezi deponované vrstvy. Mokré pískování potlačuje a tlumí účinek unášeného média, což zapříčiňuje zlepšení drsnosti povrchu v porovnání se suchým pískováním. Dále voda potlačuje vznik prachu na obrobeném povrchu a zároveň omezuje vznik tepelně indukované deformace na obrobeném povrchu. V souhrnu lze konstatovat, že se jedná o komplexní proces úpravy ostří ovlivněný spoustou proměnných parametrů. [15]

3.5 LASER

Pro použití laseru k úpravě mikro-geometrie řezného břitu je potřeba zvolit takový laserový zdroj, jehož pulsy jsou v řádu pikosekund (přesněji řečeno v řádu 10 ps). Výhodou použití takového typu laseru je minimální, příp. žádná tepelně ovlivněná oblast. [39] Laser je alternativou k tradičním způsobům úpravy ostří a lze k ní využít dle [40] například vanadového popisovacího laseru Nd: YVO₄. Energie laserového paprsku odpovídá Gaussovu rozložení, tzn., že většina výkonu je soustředěna v blízkém okolí osy svazku. Toto rozložení energie zajišťuje plynulý přechod mezi opracovanou a neopracovanou plochou na řezném nástroji. Dle Auricha [40] byl laserový systém nastaven pro práci v pulzním vlnovém módu, se kterým bylo dosaženo jak zlepšené integrity obrobeného povrchu, tak nárůstu množství odebraného materiálu. Zlepšená integrita obrobeného povrchu je způsobena použitím krátkých laserových pulzů (laserový pulz narazí do obrobku, ohřeje povrch na teplotu tavení a následně dojde k odpaření materiálu). Při použití dlouhých laserových pulzů přestupuje velké procento tepelné energie do obrobku. Tato tepelná energie zapříčiní vznik tavného pásma tudíž nevhodnou integritu povrchu.



Obr. 3 - 7: Povrch nástroje vytvořený laserovým paprskem [40]



Obr. 3 - 8: Vstupní parametry pro laserový systém [40]

Přímé vstupní parametry laseru jsou frekvence impulzů (f_p), počet odstraněných vrstev (A_I), skenovací rychlost (v_f) a faktor překrytí skenů (H). Faktor překrytí pulzů (S_p) musí být nepřímě nastaven skenovací rychlostí, průměrem bodu a frekvencí impulzů. K tomu, aby docházelo k vypařování materiálu, musí intenzita laserového paprsku I (definovaná jako výkon laseru na jednotku plochy) převyšovat hranici pro sublimaci laserem I_{ea} . V případě, že intenzita laseru bude menší než stanovená I_{ea} , tak množství roztaveného materiálu sice vzroste, ale zároveň roztavený materiál zůstane nalepen na řezném ostří. Tím dojde k zvýšení drsnosti ostří. V opačném případě ($I > I_{ea}$) dojde k požadovanému odstranění materiálu a nižší výsledné drsnosti ostří. Na obr. 3-7 je znázorněna drsnost povrchu nástroje ve vztahu k intenzitě laserového paprsku. [40]

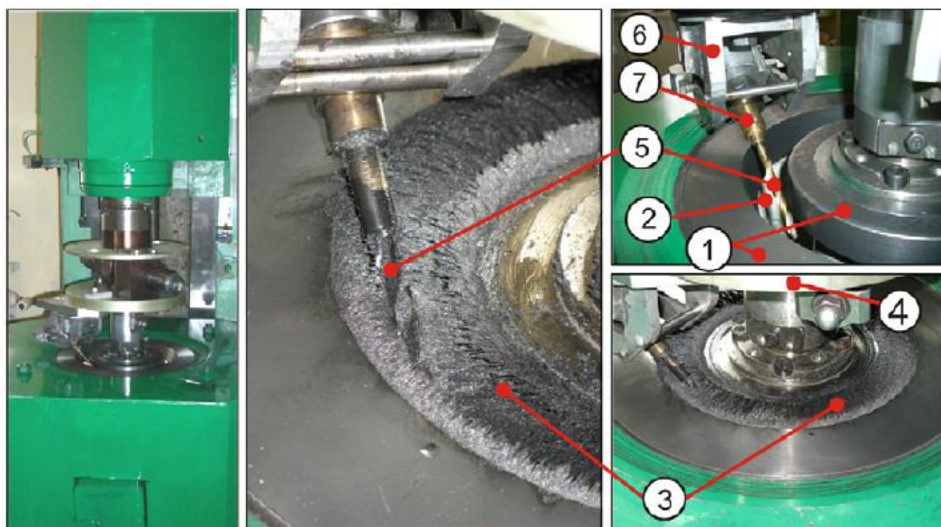
Pokud požadovaný poloměr zaoblení ostří není možné vyrobit odstraněním jedné vrstvy řezného materiálu, lze laserem odstranit více vrstev.

Laserová technologie úpravy ostří má vysoký potenciál v oblasti úpravy ostří super tvrdých řezných materiálů. Nicméně ještě není dostatečně prozkoumána a před samotnou úpravou nástrojů je nutné provést značné množství experimentů pro dosažení racionálních výsledků. Tato technologie samozřejmě vyžaduje relativně vysoké počáteční investice na výrobu a kontrolu. [15]

3.6 MAGNETICKÉ LEŠTĚNÍ

Technologie využívá magnetického pole, které se chová jako elastické pojivo pro abrazivní feromagnetická zrna. Pro magnetické leštění se obvykle využívají dva pólové nástavce prstencového tvaru v sousém postavení. Pólové nástavce vytváří pracovní oblast, která je vyplněna magneto-abrazivním práškem. Základní deska je připevněna na hlavní vřetenou stroje tak, že osa desky je totožná s osou vřetene. Nástroj je upnut v otočném přípravku, který je namontován na základní desku. Pomocí přípravku se nastavuje sklon

nástroje vzhledem k rotační rovině. Přípravek umožňuje rotaci nástroje kolem vlastní osy. Během procesu magneto-abrazivního obrábění vykonává hlavní rotační pohyb stroj a vedlejší rotační pohyb nástroj. [41] a [42]



Obr. 3 - 9: Magneto-abrazivní stroj pro výzkumné účely [41]

Účinnost magnetického leštění je závislá na typu použitého procesního média, velikosti procesního média, síle nárazu brusných zrn do povrchu nástroje a čase úpravy. Tyto faktory je nutné identifikovat a optimalizovat před vlastním procesem magnetického leštění. Mezi základní výhody této technologie patří jednoduché nastavení celého procesu, nízká pořizovací cena zařízení², nízká spotřeba energie, provoz zařízení bez nutnosti použití ochranné nebo vzduchotěsné komory a taktéž není nutná neustálá pozornost pracovníka (v případě výměny pracovníka nebo práce na směny nedochází k rozdílům mezi jednotlivými úpravami). [28], [33] a [43] Mezi další výhody technologie magnetického leštění patří:

- jednoduchý automatický proces,
- krátké procesní časy,
- vysoká opakovatelnost kvůli konstantní abrazivitě,
- rovnoměrné rozptýlení abrazivních zrn přes upravovaný povrch, což dovoluje efektivní dokončování součástí složitého tvaru,
- abrazivní zrna nejsou náchylná na přetížení,
- řezné teploty jsou nižší než 473 K,
- leštění fero-magnetických materiálů. [28], [33] a [42]

Mezi nevýhody lze zařadit kinematiku procesu, která jen stěží umožní vyrábět asymetrická ostří. [15]

² Denkena a Biermann [15] uvádí, že technologie magnetického leštění je naopak mnohem dražší než technologie vlečného omílání, a to díky pořizovací ceně zařízení a abrazivního média.

Tab. 3 - 3: Procesní média pro magnetické leštění [28]

Označení	Zaoblovaní ostří	Leštění
Střední abrazivní zrno	HSS	Standardní vrstvy
Velká abrazivní zrna	Karbidy	
Nano-abrazivní zrna	Karbidy, PCD, CBN	Supertvrdé a DLC vrstvy

Denkena a Biermann [15] uvádí, že magnetické leštění je použitelné pro úpravu ostří, ale je mnohem častěji využíváno pro povrchovou úpravu řezných částí.

3.7 BROUŠENÍ

Tönshoff a Friemuth [44] studovali nárůst vydrolování ostří při zvýšení tloušťky třísky během broušení řezné keramiky. Výsledky jejich studie prokazují, že vyšší kvality ostří lze dosáhnout snížením posuvu a použitím brusného kotouče s menší velikostí zrna nebo s vyšším obsahem zrn. *Weiner a kolektiv* [45] studovali vliv, který mají stopy po broušení na řezném nástroji, na jeho trvanlivost. Závěry jejich výzkumu byly jednoznačné. V případě, že je směr odchodu třísek z místa řezu rovnoběžný se stopami broušení, je tříska správně odváděna a tření mezi čelem nástroje a třískou je mnohem nižší než v případě, kdy stopy po broušení jsou kolmé k směru odchodu třísek. Nižší tření má za následek pokles řezných teplot a difuzního opotřebení, což vede k menší hloubce a větší šířce žlábků na čele nástroje. V případě, že jsou stopy po broušení kolmo na směr odchodu třísek z místa řezu, dochází k většímu tření a většímu pýchování třísky. V těchto případech je obvykle naměřena větší hloubka a menší šířka žlábků na čele nástroje. [45] V další studii *Weiner a Schneider* [46] sledovali vliv změny řezné rychlosti a posuvu na opotřebení ve tvaru žlábků na čele nástroje při soustružení. Použité nástroje byly VBD ze slinutého karbidu a cermetu, které byly pouze broušeny. Výsledky měření byly úzce spjaty s tepelným zatížením jednotlivých nástrojů při broušení. Teplo vznikající při broušení může způsobit mikrostrukturální změny, proměnnou tvrdost a tvorbu trhlin. [46]

Během výroby řezných nástrojů broušením vznikají malé otřepy na přechodu čela a hřbetu břitu. Broušení bez vzniku otřepů není možné, a proto se do výrobního procesu zařazují nákladné dokončovací operace. V případě, že by otřep nebyl odstraněn, tak by negativně ovlivnil geometrii řezného břitu. Dále by mohlo dojít k přehrnutí otřepu přes ostří a jeho následnému poškození při obrábění. To vše vede k nižší trvanlivosti, zhoršení drsnosti obrobeneho povrchu a menší rozměrové přesnosti výsledného obrobku. Navíc nástroj bez otřepů je pro moderní systém nástroj – vrstva absolutně nezbytný. Další nezbytností je kvalitní povrch nástroje, který zaručuje dobrý odvod třísek z místa řezu. [31]

Na závěr této kapitoly je v *tab. 3-4* provedeno relativní srovnání představených technologií úpravy ostří s ohledem na jejich charakteristické rysy dle literatury [15].

Tab. 3 - 4: Relativní porovnání jednotlivých metod úpravy ostří s ohledem na jejich charakteristické rysy [15]

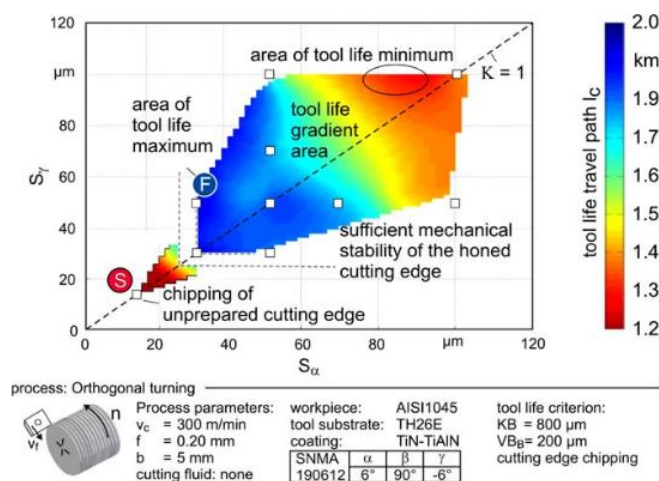
	Broušení	Kartáčování	Vlečné omílání	Pískování	Magnetické leštění	Laser	EDM
Požizovací náklady	+	0	0	0	0	-	-
Produktivita	+	+	+	+	-	-	-
Integrace do výrobního řetězce	++	+	+	+	0	-	-
Rozsah vyrobitelných zaoblení ostří	0	+	+	+	+	0	0
Přesnost a opakovatelnost	++	0	+	+	-	+	-
Vyrobitelnost asymetrických ostří	+	0	-	+	-	0	-
Úprava super tvrdých rezných materiálů	0	0	0	0	0	++	+
Úprava místně omezených rezných částí	+	0	-	+	-	+	0
Úprava komplexní geometrie ostří	-	0	+	+	+	+	0

4. OBECNÝ PŘÍNOS ÚPRAVY MIKRO-GEOMETRIE BŘITU NA ŘEZIVOST NÁSTROJE

Aby bylo možné vyjádřit přínos úpravy mikro-geometrie břitu na řezivost nástroje, je nutné porovnat nástroj s upraveným řezným břitem s referenčním nástrojem. Referenčním nástrojem může být jak nástroj s vybroušenými funkčními plochami, tak nástroj s definovanou úpravou břitu. Následné porovnání je obvykle provedeno na základě měřitelných parametrů, kterými mohou být řezné síly, teploty, opotřebení řezného břitu, dosažená trvanlivost apod. Výsledky rešeršní činnosti, zaměřené na oblast úpravy ostří a její přínos v oblasti zvýšení řezivosti, jsou uvedeny v jednotlivých odrážkách:

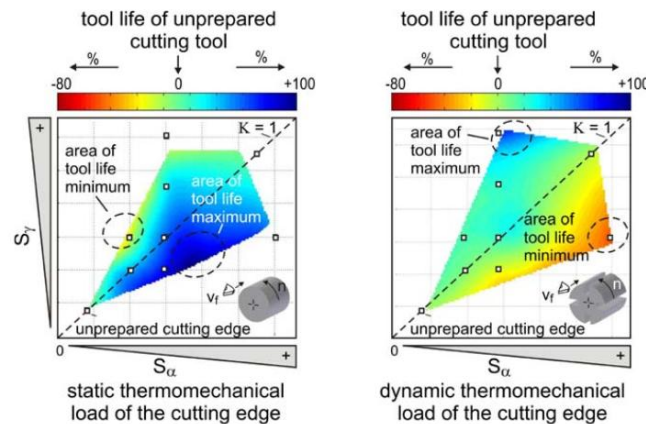
1. Experiment zaměřený na obrábění korozivzdorné oceli VBD ze slinutého karbidu deponovaného vrstvou TiN – TiAlN. Řezné ostří bylo upraveno tak, že faktor symetričnosti K pro experimentální měření byl: $K = 1$, $K > 1$ a $K < 1$. Nástroj s neupraveným ostřím se opotřebovával především formou vydrolení částí řezného břitu. Nástroje s upraveným ostřím se opotřebovávaly rovnoměrně. Nejvyšší trvanlivosti dosáhl nástroj s úpravou $S_\gamma = 50 \mu\text{m}$ / $S_\alpha = 30 \mu\text{m}$ a naopak nejnižší trvanlivosti dosáhl nástroj s úpravou $S_{\omega\gamma} = 100 \mu\text{m}$ a $S_\gamma = 50 \mu\text{m}$ / $S_\alpha = 100 \mu\text{m}$. Na obr. 4-1 je vytvořena mapa trvanlivosti pro jednotlivé nástroje. Zobecní-li se výše uvedené hodnoty a hodnoty vynesené v grafu na obr. 4-1, tak faktor symetričnosti K ovlivňuje způsob opotřebení řezného nástroje. Řezné nástroje s konstantní hodnotou S_γ a vyššími hodnotami S_α se opotřebovávají především na hřbetě a hodnota S_α má dominantní vliv na velikost řezných sil.

Z dosažených výsledků vyplynulo, že nástroj s neupraveným ostřím (v tomto případě je vyjádřena trvanlivost řezného břitu dráhou nástroje) dosáhl trvanlivosti 0,49 km. Nástroj s úpravou řezného břitu $S_\gamma = 50 \mu\text{m}$ / $S_\alpha = 30 \mu\text{m}$ dosáhl trvanlivosti 2 km, tzn., že vhodnou úpravou ostří lze navýšit trvanlivost až 5-ti násobně. [25]



Obr. 4 - 1: Mapa dosažených trvanlivostí [25]

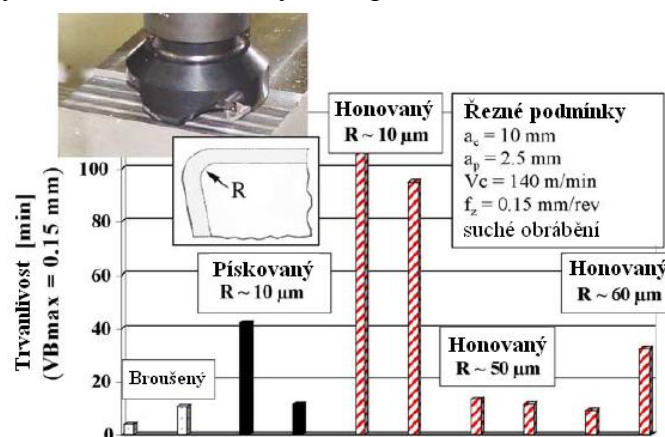
Denkena a kol. [25] uvádí, že volba K je závislá na realizované technologii. Při nepřerušovaném řezu je doporučováno volit $K < 1$ a naopak, při přerušovaném řezu $K > 1$ (viz obr. 4-2).



Obr. 4 - 2: Vliv K na trvanlivost při nepřerušovaném a přerušovaném řezu [25]

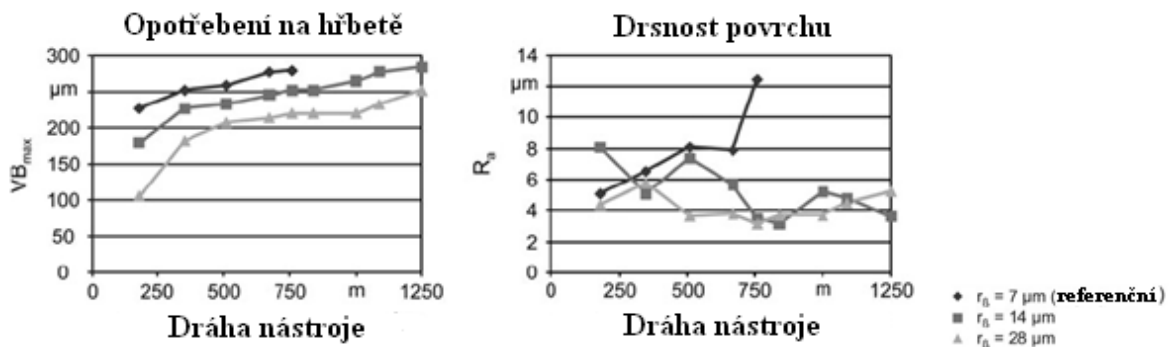
- Zvýšení řezivosti nástroje při frézování s 1 VBD z PM-HSS. Použité úpravy řezného břítu byly: honování a mikro-pískování. Nástroj byl deponován vrstvou TiAlN. Honování je ruční úprava ostří využívající honovacího kamene a pasty nebo diamantového pilníčku. Na testovaných VBD byla vytvořena zaoblení ostří o velikosti 10, 50 a 60 μm . Výsledná trvanlivost řezného břítu pro jednotlivé úpravy ostří byla srovnána s referenčním (neupraveným) nástrojem. Referenční nástroj dosáhl nejnižší trvanlivosti, neboť nejprve došlo k delaminaci vrstvy a poté k vydrolení částí řezného břítu. Nástroje s upraveným ostřím si vedly o poznání lépe (viz obr. 4-3).

Další rozdíly dosažených trvanlivostí lze pozorovat mezi honovaným a mikro-pískovaným řezným břitem s $r_n = 10 \mu\text{m}$. U mikro-pískovaných VBD nebyl průběh opotřebení stabilní a také bylo dosaženo o cca 60÷70 min nižší trvanlivosti v porovnání s honovaným nástrojem. Rozdíl mezi referenčním nástrojem a nástrojem s honovaným ostřím činil cca 400 %. Nástroje s $r_n = 50$ a 60 μm v průběhu obrábění nejprve vykazovaly dobré výsledky, ale po určitém čase došlo k vydrolení deponované vrstvy a řezný břit se začal velmi rychle opotřebovávat. [47]



Obr. 4 - 3: Trvanlivost řezného břítu dosažená s různými úpravami ostří [47]

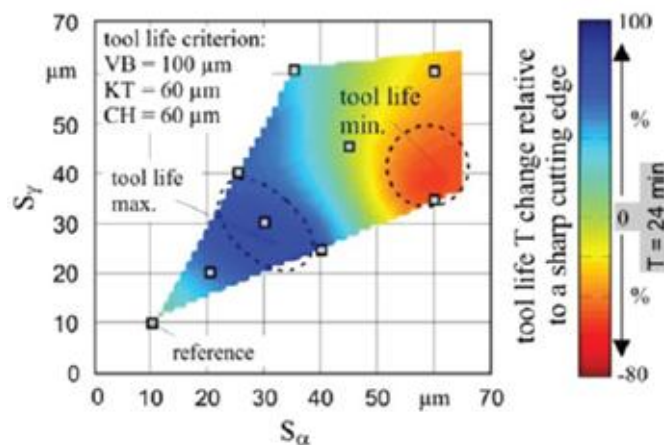
3. Využití laseru pro úpravu ostří. I tento způsob úpravy přináší určitá zlepšení v oblasti zvyšování řezivosti nástroje, kdy upraveným nástrojem je možné nejen odebrat větší množství materiálu obrobku, ale také dosáhnout nižších hodnot drsností obrobku, viz *obr. 4-4*. V tomto případě úprava mikro-geometrie řezného břitu zajistila zvýšení trvanlivosti minimálně o 100%, přičemž bylo zjištěno, že se zvyšujícím se poloměrem zaoblení ostří (v testovaném rozsahu, tzn. $7 \div 28 \mu\text{m}$) se zvyšuje trvanlivost. [40]



Obr. 4 - 4: Trvanlivost řezného břitu a drsnost obrobku nástrojem s laserově upraveným ostřím [40]

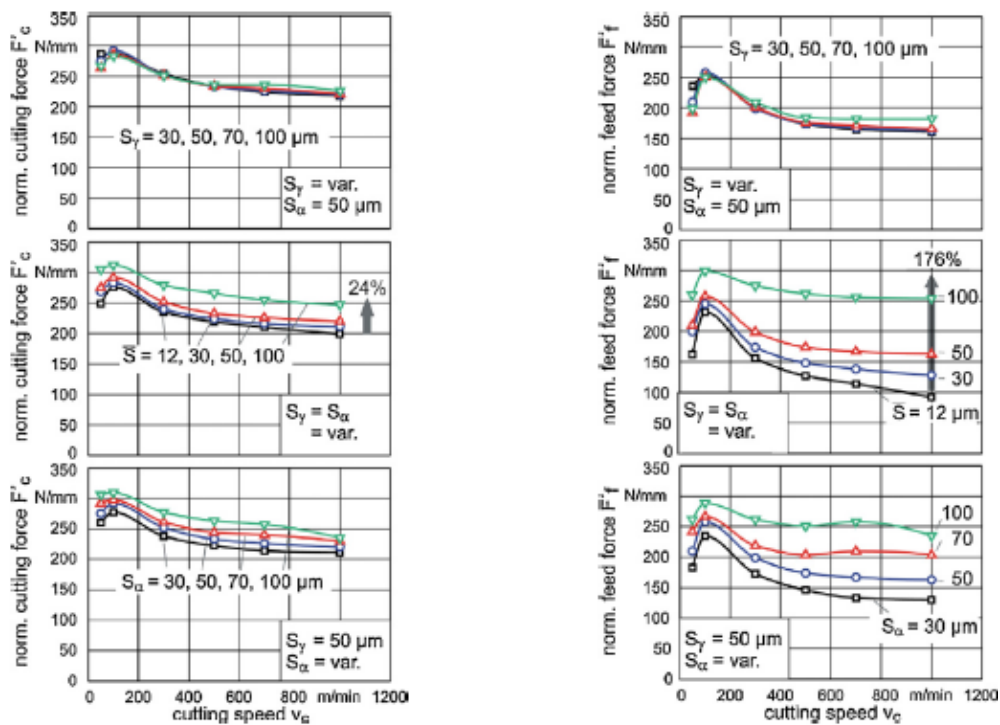
Laserem je možné upravovat všechny druhy řezných materiálů včetně diamantu. Pozorováním nástroje pod mikroskopem je možné zjistit, že zrnka substrátu tvořící ostří jsou „odříznutá“ a povrch vykazuje homogenní strukturu po celém poloměru zaoblení ostří. Při experimentálním měření bylo zároveň zjištěno, že se zvyšujícím se poloměrem zaoblení ostří narůstají řezné síly. [39]

4. Frézování jednobřitým nástrojem, jehož ostří bylo upraveno kartáčováním. Testované nástroje měly symetricky a asymetricky upravený řezný břit. Pro nástroje, kde $K = 1$, bylo vytvořeno r_n v rozsahu 20 až 60 μm , přičemž nejvyšší trvanlivosti bylo dosaženo s nástrojem, kde $r_n = 30 \mu\text{m}$ ($T \approx 48 \text{ min.}$), viz *obr. 4-5*. Nástroj s $r_n = 20 \mu\text{m}$ se opotřeboval ve formě vydrolení ostří. Trvanlivost nástrojů s proměnným faktorem symetričnosti byla ovlivněna především velikostí S_α . S navyšováním hodnoty S_α narůstalo opotřebenění na hřbetě, což nepříznivě ovlivnilo trvanlivost. Důvodem je větší kontaktní délka l_α s obrobkem plochou. [13]

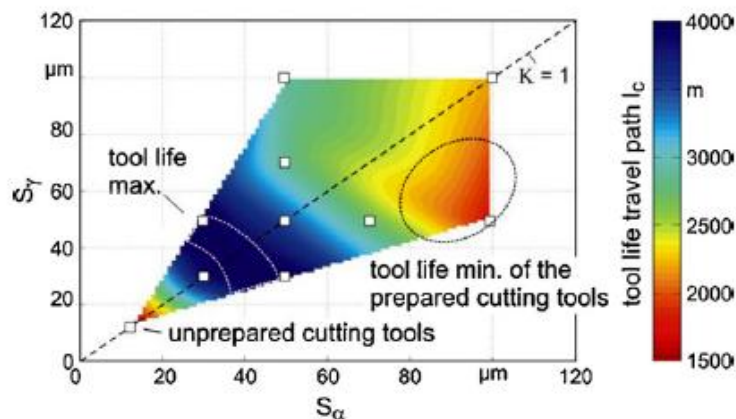


Obr. 4 - 5: Mapa trvanlivosti pro materiál obrobku 42CrMo4 [1] a [13]

5. Možnosti zvýšení mechanické stability řezného břitu zvětšením hodnoty S_γ bez výrazného nárůstu řezných teplot. *Bassett a kol.* [3] ve svém článku uvádí, že navýšením hodnoty S_α dojde k zvýšení řezných teplot. Tento jev je spojen s oblastí terciální plastické deformace v kombinaci s větší kontaktní délkou l_α . Podobný jev je možné pozorovat u řezných sil. Při konstantní hodnotě S_α a proměnné hodnotě S_γ nemá změna S_γ výrazný vliv na velikost řezných sil (včetně posuvové složky řezné síly). Pro symetricky upravené ostří a proměnné S_α dochází k nárůstu řezných sil. Hlavní vliv těchto úprav je na posuvovou složku (*obr. 4-6*). Velikost S_α má také vliv na trvanlivost a je zodpovědné za opotřebení na hřbetě (*viz obr. 4-7*). Z tohoto obrázku taktéž vyplývá, že nevyšší hodnoty trvanlivosti bylo dosaženo pro případ $S_\alpha = 30 \mu\text{m}$ a $S_\gamma = 50 \mu\text{m}$. [3]

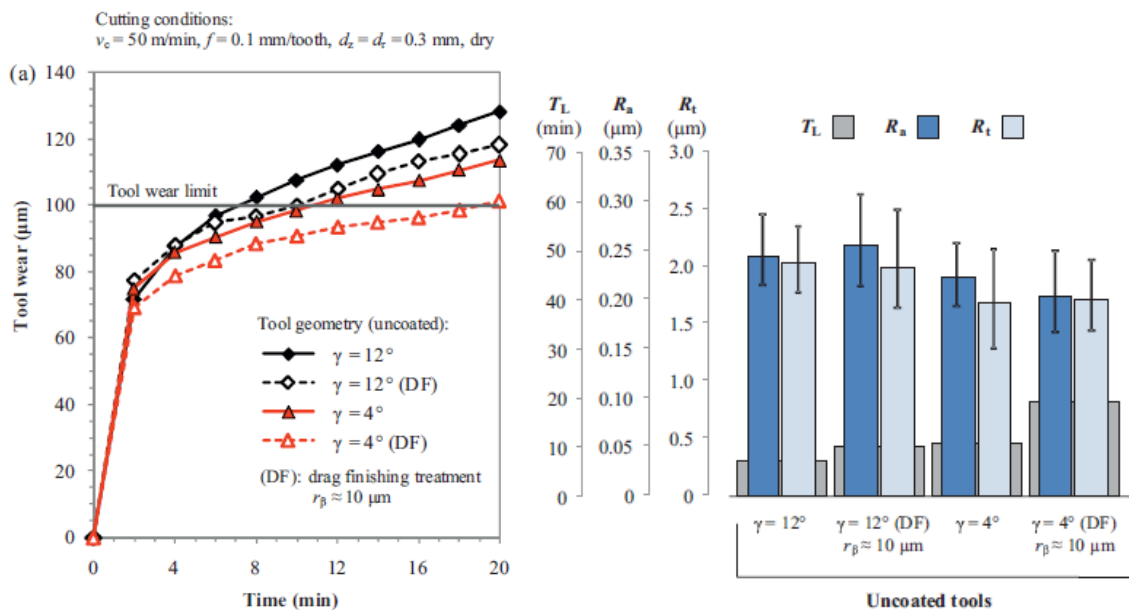


Obr. 4 - 6: Vliv mikro-geometrie břitu na řezné síly ($v_c = \text{proměnná}$, $f_{ot} = 0,1\text{mm}$, $\gamma_o = -6^\circ$) [3]



Obr. 4 - 7: Mapa trvanlivosti pro ortogonální soustružení oceli AISI1045 ($v_c = 300\text{ m/min}$; $f_{ot} = 0,1\text{ mm}$) [3]

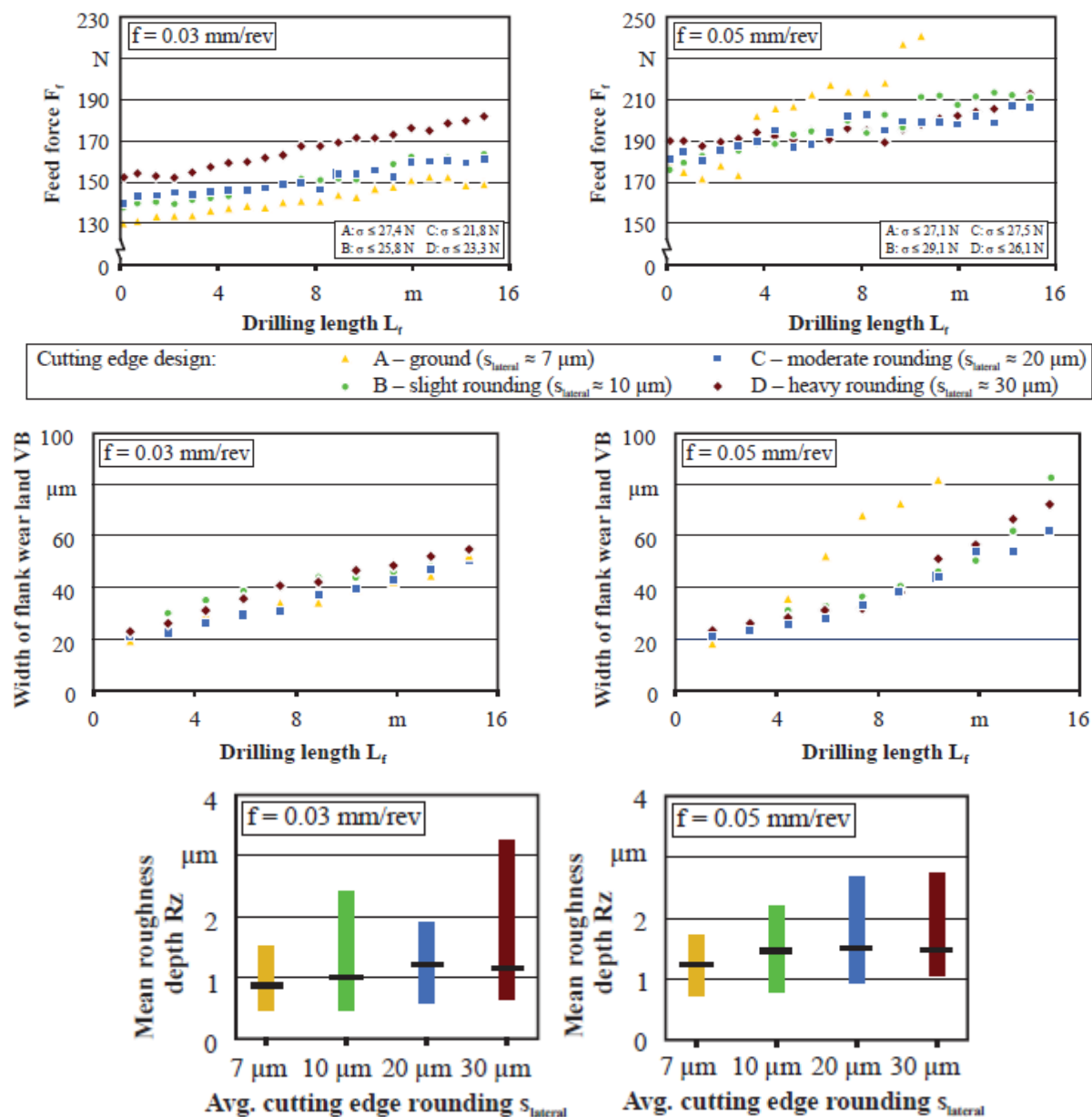
6. Vzájemné porovnání frézovacích nástrojů s proměnným úhlem čela a způsobem úpravy ostří. Předmětem experimentů byly nástroje s úhlem čela 4° a 12° . Nástroje byly broušeny na $r_n = 5 \mu\text{m}$ a vlečně omílány na $r_n = 10 \mu\text{m}$. Výsledky jsou znázorněny v obr. 4-8. Vlečné omílání zvýšilo trvanlivost přibližně o 40% u nástroje s $\gamma_o = 12^\circ$ a o 75% u nástroje s $\gamma_o = 4^\circ$ oproti nástrojům broušeným. Na výslednou trvanlivost měl také výrazný vliv γ_o . Čím vyšší γ_o , tím menší β_o a také menší trvanlivost. Samotné úpravy neměly výrazný vliv na výslednou drsnost obrobeneho povrchu. Hodnoty R_a a R_t byly ovlivněny především velikostí opotřebení řezného břitu. [34]



Obr. 4 - 8: Vliv úhlu čela a úpravy ostří na trvanlivost a drsnost obrobeneho povrchu [34]

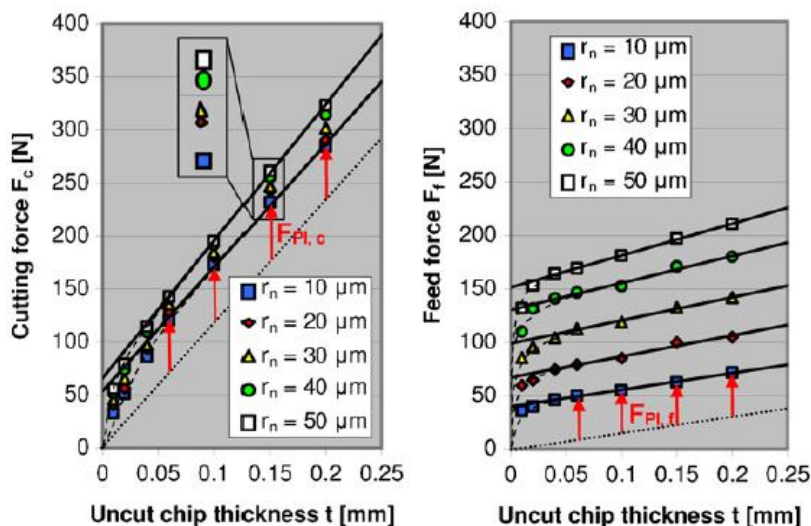
7. Silové zatížení nástroje a jakost obrobeneho povrchu při hlubokém vrtání dělovým vrtákem, jehož ostří bylo upraveno pískováním na $r_n = 10, 20$ a $30 \mu\text{m}$. Výsledky byly porovnány s referenčním nástrojem, který představuje broušený řezný břit s $r_n = 7 \mu\text{m}$. Výsledky na obr. 4-9 prozrazují, že posuv měl výrazný vliv na trvanlivost a posuvovou složku řezné síly. V případě nižšího posuvu vykazoval referenční nástroj nejnižší silové zatížení. Při navýšení posuvu tomu bylo naopak. I v tomto případě byly řezné síly úzce spjaty s velikostí opotřebení. Tento jev lze vysvětlit vyšším tlakem v oblasti vzniku třísky. Z hlediska trvanlivosti, která je v tomto případě vyjádřena délkou vrtání dělového vrtáku, dosáhl nejlepších výsledků nástroj s poloměrem zaoblení ostří $20 \mu\text{m}$, a to jak pro nižší, tak i pro vyšší posuv. [5]

Velikost posuvu taktéž ovlivnila drsnost obrobeneho povrchu. Při nižším posuvu dosahovala průměrná hodnota R_z nižších hodnot a naopak. [5]



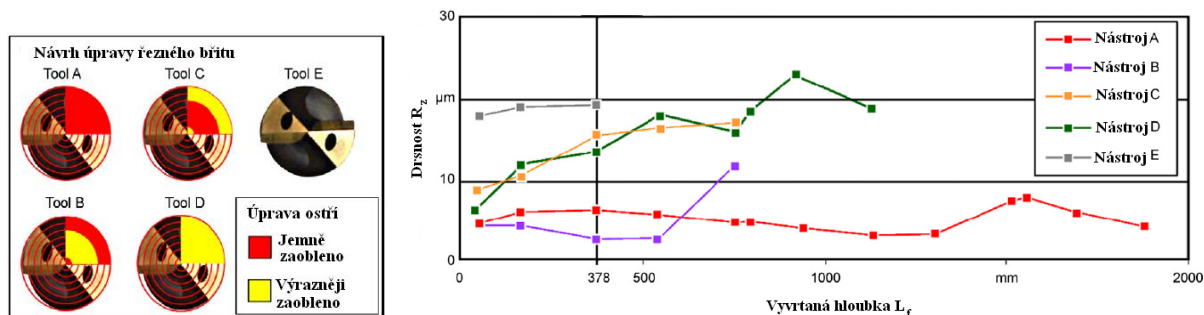
Obr. 4 - 9: Posuvová síla, opotřebení na hřbetě a drsnost obroběného povrchu při hlubokém vrtání upravenými nástroji [5]

8. Vliv poloměru zaoblení ostří na velikost řezných sil při ortogonálním frézování. Zaoblení ostří bylo vytvořeno suchým pískováním na vyměnitelných břitových destičkách ze slinutého karbidu WC-Co se střední velikostí zrna a $r_n = 10, 20, 30, 40$ a $50 \mu\text{m}$. Podmínkou experimentů bylo, že $t = f_{ot}$, tzn., nedeformovaná tloušťka odřezávané vrstvy je rovna otáčkovému posuvu. Řezná síla a posuvová síla se zvětšují s poloměrem zaoblení ostří (obr. 4-10). Řezná síla F_c je méně citlivá na změny poloměru zaoblení ostří než posuvová síla F_f . Vztah mezi F_c a t je nelineární pro malé hodnoty t . Pro vyšší hodnoty t mohou být naměřené body proloženy přímkou. [10]



Obr. 4 - 10: Řezná a posuvová síla při soustružení oceli Ti-6Al-4V s různými poloměry zaoblení [10]

9. Dalším příkladem může být úprava řezného břitu na šroubovitým vrtáku s poloměrem zaoblení ostří 20 μm (tzv. jemné zaoblení), 60 μm (tzv. výrazné zaoblení) a kombinace těchto dvou rozměrů, které byly vytvořeny mokrým pískováním. Nástroje byly srovnávány s referenčním nástrojem (označovaným písmenem E) bez jakékoliv úpravy ostří. Nástroje byly deponovány vrstvou TiN a použity při vrtání oceli AISI 1045 při $v_c = 450$ m/min a $f_{ot} = 0,375$ mm. [48]



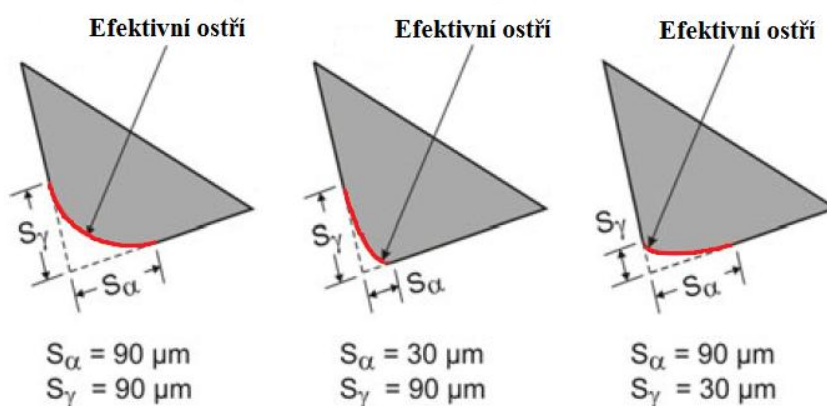
Obr. 4 - 11: Úpravy ostří na šroubovitým vrtáku versus dosažené výsledky [48]

Během experimentálního měření bylo zjištěno, že nástroj E má výrazné opotřebení podél celého řezného ostří a kombinace neupraveného ostří spolu s vysokými řeznými silami zapříčinila plastickou deformaci řezného břitu. Dále je z výsledků na obr. 4-11 patrné, že nástroj s $r_n = 20$ μm (tj. nástroj A), dosáhl nejen nejnižších hodnot drsnosti obrobeneho povrchu, ale taktéž vysoké trvanlivosti v porovnání s ostatními nástroji. Bierman a Terwey [48] uvádí, že průběhy drsností pro jednotlivé nástroje odpovídají průběhům opotřebení. [48]

4.1 ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU VLIVU ÚPRAV MIKRO-GEOMETRIE BŘITU NA ZVÝŠENÍ ŘEZIVOSTI

Z dostupných informačních zdrojů vyplynuly následující závěry:

- U nástrojů bez jakékoliv úpravy ostří dochází k vydrolení částí řezného břitu. Pokud je takovýto nástroj deponován tenkou vrstvou, následuje delaminace a velmi rychlé opotřebení.
- Z hlediska makro-geometrie řezného břitu je rozhodující velikost úhlu břitu. Čím pozitivnější úhel čela, tím menší úhel břitu což vede k vyšším požadavkům na úpravu řezného břitu (tj. vyšší hodnoty r_n).
- Jednotlivé složky řezných sil narůstají se zvětšujícími se hodnotami r_n a S_α (narůstající hodnoty snižují ostrost).



Obr. 4 - 12: Schematická ilustrace profilu zaobleného ostří [6]

- Změna r_n má vliv především na posuvovou složku řezné síly (F_f).
- Se zvyšujícím se poloměrem zaoblení ostří, pro $K = 1$, dochází k nárůstu trvanlivosti. Horní hranice velikosti r_n , pro které je toto tvrzení pravdivé, není v literatuře přesně stanovena, ale obecně se pohybuje od 20 do 30 μm .
- Volba K je spjata s technologií; $K > 1$: přerušovaný řez; $K < 1$: nepřerušovaný řez.
- K má vliv na velikost jednotlivých složek řezných sil a teplot. Při proměnném S_α dochází k jejich nárůstu a naopak při změně S_γ není patrný jejich výrazný vliv.
- Při nepřerušovaném řezu je doporučeno volit $S_\alpha > S_\gamma \rightarrow$ dochází k abrazivnímu opotřebení hřbetu případně lomu řezného břitu.
- Při přerušovaném řezu je doporučeno volit $S_\gamma > S_\alpha \rightarrow$ dochází k zvýšení pevnosti řezného břitu.
- Vhodnou úpravou ostří je možné zvýšit trvanlivost nástroje až o 400 %.

5. SHRnutí POZNATKŮ A STANOVENÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE

5.1 POZNATKY

Ze závěrů uvedených v kapitole 4.1 je patrné, že úprava mikro-geometrie řezného břitu je nezbytným prostředkem pro zvýšení výkonnosti/řezivosti nástroje. První zmínka o nutnosti úpravy mikro-geometrie je datována k roku 1994 společností Sandvik [3]. V současné době si mnoho výrobců řezných nástrojů tuto skutečnost uvědomuje a zařazuje ji do svého výrobního řetězce. Nejpoužívanějšími technologiemi úprav ostří v hromadné výrobě monolitních nástrojů a nástrojů s VBD jsou kartáčování, omílání a mikro-pískování. V oblasti kusové/malosériové výroby nástrojů je úprava ostří prováděna ručním honováním. Řezné nástroje s takto upravenou mikro-geometrií dosahují vyšší trvanlivosti než nástroje s vybroušenými funkčními plochami. Dle použité technologie je možné vytvořit definované poloměry zaoblení ostří:

- Kartáčování $r_n > 30 \mu\text{m}$
- Mikro-pískování $5 \mu\text{m} < r_n < 20 \mu\text{m}$
- Omílání $r_n < 150 \mu\text{m}$
- Laser $r_n < 49 \mu\text{m}$

Tvar vytvořené mikro-geometrie nástroje je charakterizován, tzv. faktorem symetričnosti K . Faktor K může být $= 1$, > 1 a < 1 . Pokud je $K = 1$, jedná se o dokonale symetrický tvar, který je možné vytvořit pouze honováním. Ve skutečnosti všechna ostří upravená výše zmiňovanými technologiemi mají určitou nesymetričnost. Nesymetričnost je způsobena buď nemožností jednotlivých zařízení principiálně dosáhnout symetričnosti, nebo úmyslně, tak aby úprava ostří odpovídala zamýšlenému použití. $K > 1$ je používán na nástroje pro větší tloušťky odřezávané vrstvy a hrubovací operace, kdežto $K < 1$ je používán na nástroje pro menší tloušťky odřezávané vrstvy a dokončovací operace.

Přestože jsou v současné době úpravy mikro-geometrie řezného břitu jednotlivými výrobci nástrojů hojně využívány a na akademické půdě již vznikla řada příspěvků na dané téma, vždy se vyskytne oblast, která není dostatečně zmapována. Z dostupných zdrojů je možné získat informace týkající se vlivu poloměru zaoblení ostří obvykle na jeden, případně dva sledované parametry (T , F , Q_c , R_a apod.). Takovýto přístup je nedostačující, neboť pouze důsledným sledováním všech měřitelných parametrů řezného procesu je možné komplexně popsat přínos jednotlivých úprav mikro-geometrie na řezivost nástroje.

Z literární rešerše (kapitola 4) vyplynulo, že se zvyšujícím se r_n trvanlivost nástroje narůstá a jeho „optimální“ hodnota se pohybuje v rozmezí $10 \div 30 \mu\text{m}$, což je poměrně široký rozsah. Dále je prokázáno, že „optimální“ r_n je závislý na obráběném materiálu, řezném materiálu a řezných podmínkách. Co však vysledováno není, je vhodná či optimální velikost r_n s ohledem na tloušťku odřezávané vrstvy a její vliv na kvalitativní parametry obrobene plochy. Stejným způsobem je tomu u K . Do současné chvíle je dostatečně zmapován vliv K především na trvanlivost řezného břitu pro $h \gg S_a$ a S_γ . Co se však stane, pokud tomu bude naopak? Je možné zobecnit tvrzení, že $K > 1$ je vhodný pro přerušovaný řez? Jaký vliv

má **K** na drsnost obrobeného povrchu? Na všechny položené otázky by tato disertační práce měla odpovědět.

5.2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Tato práce navazuje na projekt „Zproduktivnění obrábění oceli P91 při rovinném frézování dělicí roviny tělesa parní turbíny“ a na disertační práci Z. Jandy [49]. Hlavním cílem projektu bylo **zproduktivnění** obrábění, kterého lze v zásadě dosáhnout vhodnou volbou řezného materiálu a řezných podmínek. Problematickou částí projektu bylo dokončovací frézování, a to nejen z hlediska obráběného materiálu, ale též z hlediska omezujících podmínek, jimiž bylo:

- obrábění pouze 1 VBD
- hloubka řezu $a_p = 0,02$ mm
- objem odebraného materiálu $V = 60$ cm³
- $Ra \leq 0,8$ μm

Z. Janda [49] detailně popsal problematiku frézování feriticko-martenzitické oceli a specifikoval určitá doporučení z hlediska použitého řezného materiálu a řezných podmínek, na které tato práce navazuje. Z výsledků experimentálního studia vyplynuly následující závěry. Pro obrábění oceli, s obchodním označením P91, je vhodný sub-mikronový slinutý karbid s označením IN2004. Doporučené řezné podmínky, pro dokončovací frézování, byly stanoveny:

- $v_c = 270$ m/min
- $f_z = 4,5 \div 6$ mm

Jelikož slinutý karbid IN2004 je deponován tenkou vrstvou TiAlN, tak veškeré úpravy mikro-geometrie břitu byly, pro účely této práce, prováděny na jeho nedeponované podobě, tj. slinutém karbidu s označením IN04S. Charakteristika oceli P91 a řezného materiálu IN2004 je uvedena v příloze **P2** a **P3**.

Hlavním cílem disertační práce je popsat vliv různých způsobů úprav mikro-geometrie břitu na řezivost nástroje IN04S při dokončovacím obrábění oceli P91. Jednotlivé úpravy mikro-geometrie budou vzájemně porovnány z hlediska sledovaných parametrů, kterými budou:

- **trvanlivost,**
- **způsob opotřebení řezného břitu,**
- **řezné síly,**
- **drsnost obrobeného povrchu.**

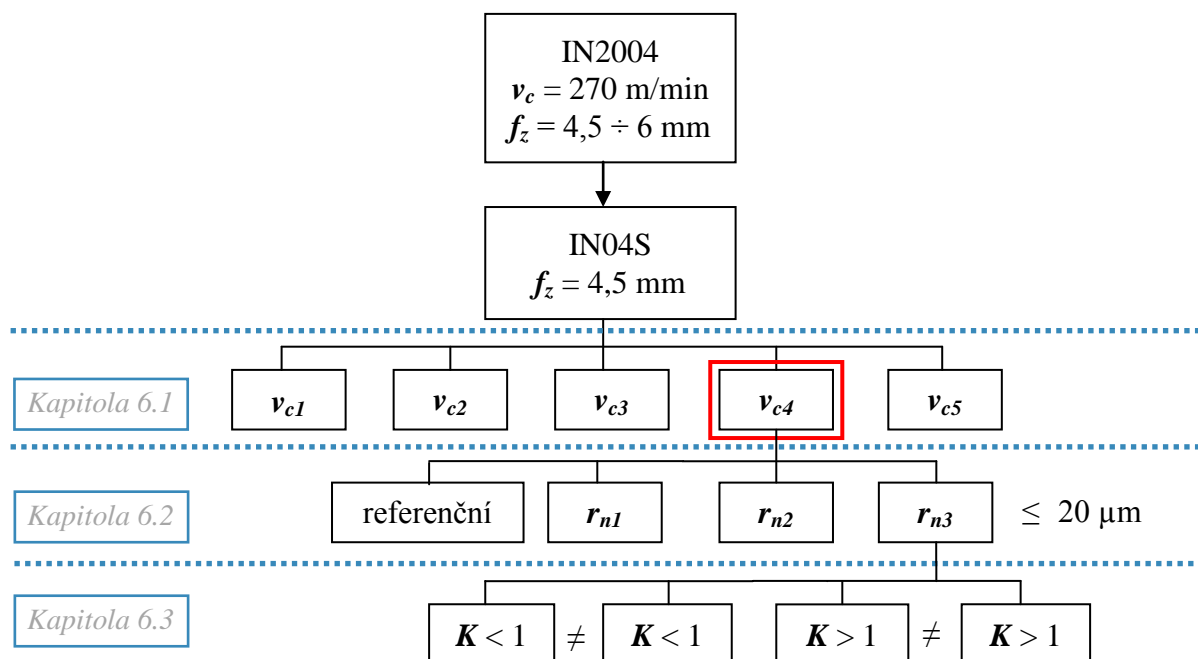
Dílčí cíle:

1. Experimentálně vybrat nejvhodnější řezné podmínky pro nástroj IN04S v režimu dokončovacího frézování. Následně analyzovat a vyhodnotit vliv řezných podmínek na řezný proces a kvalitu obrobeného povrchu.

2. Vytvořit soubor teoretických poznatků popisujících přínos úpravy mikrogeometrie řezného břitu. Konkrétně budou sledovány následující faktory:
 - a) poloměr zaoblení ostří - r_n
 - b) faktor symetričnosti ostří - K
3. Experimentálně vybrat nejvhodnější r_n a hodnotu faktoru symetričnosti K .
4. Analyzovat a vyhodnotit vliv jednotlivých výše uvedených faktorů na řezný proces a kvalitu obrobeneho povrchu.
5. Sestavit určitá doporučení a závěry pro praktickou aplikaci.

5.3 POSTUP ŘEŠENÍ PROBLEMATIKY ZVYŠOVÁNÍ ŘEZIVOSTI NÁSTROJE IN04S

S ohledem na potenciálně široký rozsah experimentálního měření byl navržen určitý postup zjednodušení ve smyslu redukce počtu úrovní jednotlivých faktorů a stanovení návaznosti na výsledky jednotlivých etap řešení. Na *obr. 5-1* je zobrazeno schéma řešení, na které navazuje popis jednotlivých etap.



Obr. 5 - 1: Schéma postupu řešení experimentální činnosti

Postup řešení experimentální činnosti:

Kapitola 6. 1: Test řezivosti originální VBD IN04S

Nalezení vhodných řezných podmínek dle kritérií pro nástroj IN04S v režimu dokončovacího frézování. Pro vzájemné srovnání naměřených dat a následné porovnání úprav mikro-

geometrie řezného břitu bylo nutné nalézt vhodné řezné podmínky. Jedinou proměnnou byla řezná rychlost, která byla volena z intervalu $140 \div 230$ m/min. Posuv na zub, axiální a radiální hloubka řezu byly konstantní a konstantními zůstaly po celou dobu experimentální činnosti (tj. $f_z = 4,5$ mm; $a_p = 0,02$ mm; $a_e = 50$ mm).

Kapitola 6.2: Test řezivosti upravené VBD s proměnným poloměrem zaoblení ostří (r_n)

Test řezivosti pro nástroj IN04S s $r_n = 10, 15$ a 20 μm a porovnání dosažených výsledků s referenčním nástrojem. Od společnosti Ingersoll byla objednána sorta 100 ks vyměnitelných břitových destiček, které měly pouze vybroušené funkční plochy. Na vybraném počtu VBD byla provedena úprava ostří technologií vlečného omílání a byl vytvořen definovaný poloměr zaoblení ostří s faktorem symetričnosti $K \approx 1$. Omezující hodnotou poloměru zaoblení ostří byla axiální hloubka řezu, tzn. $r_{ni} \leq 20$ μm .

Kapitola 6.3: Test řezivosti VBD s proměnným faktorem symetričnosti (K)

Tato kapitola je věnována objasnění vlivu faktoru symetričnosti na řezivost nástroje. Hodnoty S_a a S_γ byly voleny s ohledem na technologické možnosti omílacího zařízení. Dosažené výsledky jsou porovnány nejen s výsledky kapitoly 6.2, ale také se závěry z literární rešerše.

5.4 KRITERIÁLNÍ PODMÍNKY EXPERIMENTÁLNÍHO OBRÁBĚNÍ

Před započítáním experimentálního obrábění bylo nutné stanovit kritéria experimentu. Kritéria vychází z práce Z. Jandy [49] a projektu řešeného ve spolupráci s Doosan Škoda Power. Těmito kritérii jsou:

- obrábění 1VBD,
- drsnost obrobeného povrchu $Ra \leq 0,8$ μm ,
- objem odebraného materiálu $V = 60$ cm^3 ,
- $VB_{max_krit} = 150$ μm ,
- $KB_{krit} = 150$ μm .

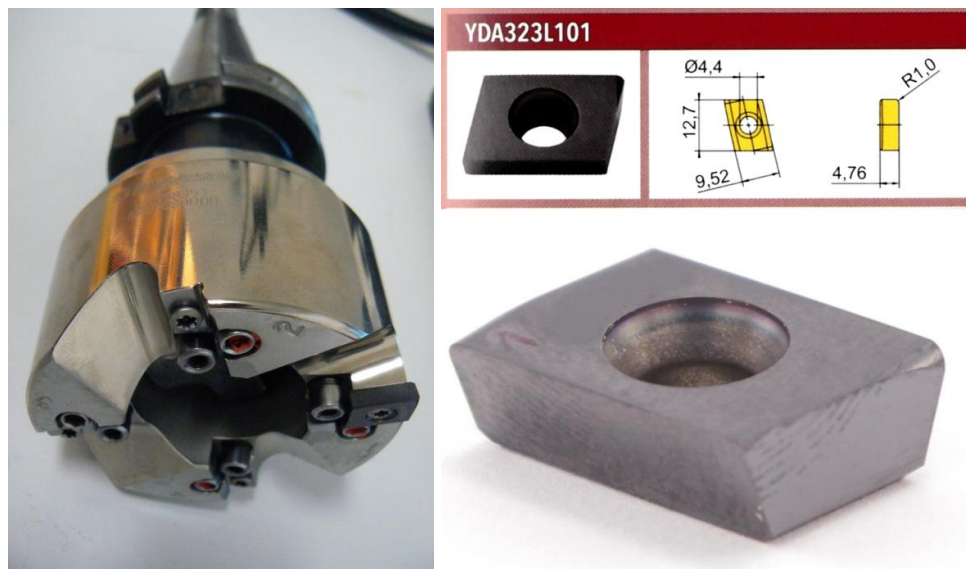
5.5 CHARAKTERISTIKA NÁSTROJE IN04S

Řezný materiál s označením IN04S je jemnozrný slinutý karbid s označením destičky YDA323L101. Jedná se o kosočtvercovou vyměnitelnou břitovou destičku s wiper (hladící) geometrií pro dokončování s poloměrem špičky $r_e = 1,0$ mm (charakteristika wiper geometrie viz příloha P4). Tento typ řezného materiálu je výrobcem určen pro obrábění hliníku s vysokým obsahem křemíku při vysokých řezných rychlostech a pro lehké a středně těžké obrábění šedé litiny. Jedná se o nepovlakovaný nástroj určený pro obrábění ISO skupiny materiálů K10 – K20. Charakteristickými vlastnostmi jsou:

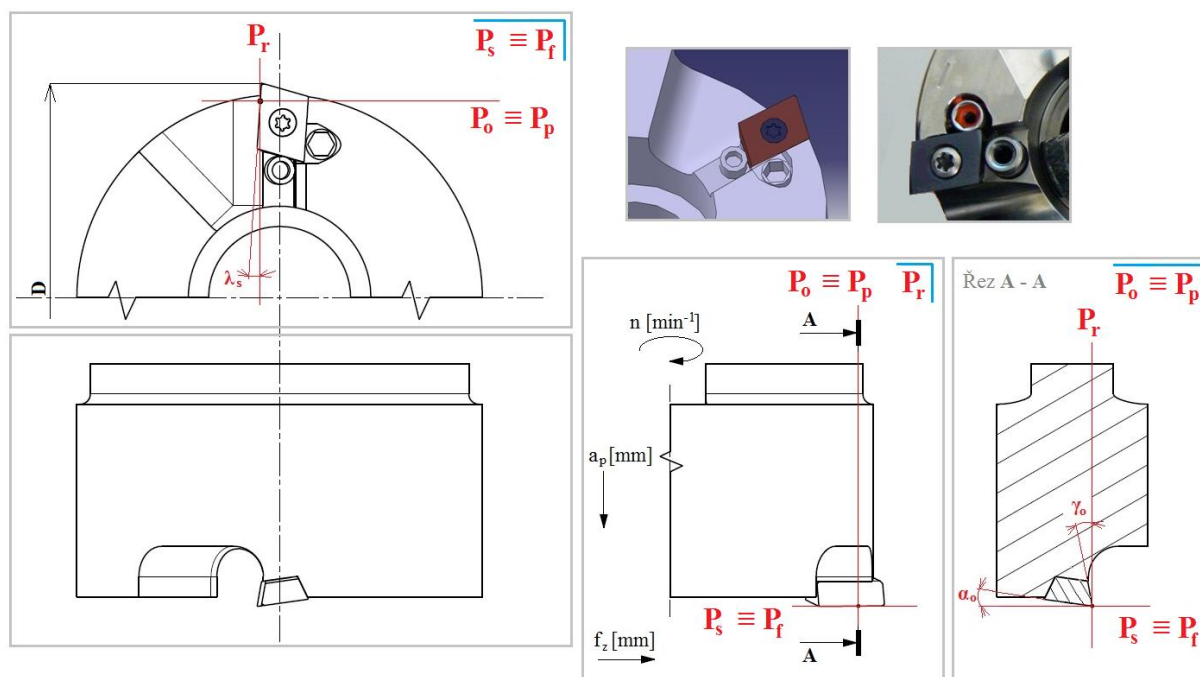
- extrémně vysoká odolnost proti opotřebení na hřbetě,
- mírná odolnost proti opotřebení ve tvaru žlábků na čele,
- nízká odolnost proti teplotním šokům,
- velmi nízká odolnost proti rázům. [50]

Doporučená hodnota posuvu (z katalogu společnosti Ingersoll) $f_{ot} = 1 \div 5$ mm.

Vyměnitelné břitové destičky byly upínány do frézovací hlavy o $\varnothing 80$ mm s označením 6F2B080R00. Dokončovací frézovací hlava s tangenciálně uloženými VBD a geometrie destiček YDA323L101 jsou znázorněny na *obr. 5-2* a roviny nástrojové souřadnicové soustavy na *obr. 5-3*.



Obr. 5 - 2: Dokončovací frézovací hlava 6F2B a geometrie destičky YDA323L101



Obr. 5 - 3: Roviny nástrojové souřadnicové soustavy

Bližší specifikace rezného materiálu IN04S je uvedena v příloze **P2-1**.

5.6 KLASIFIKACE MATERIÁLU OBROBKU

Materiál P91 (EN X10CrMoVNbN9-1, W. Nr. 1.4903) je označován jako feriticko-martenzitická žároveňná legovaná ocel s poměrně nízkým obsahem uhlíku. Dle chemického

složení má ocel martenzitickou strukturu v širokém rozsahu ochlazovacích rychlostí s tvrdostí max. 420HV (260HB). Označení této oceli lze vysvětlit následovně P91 = **P**late **9%** Cr – **1%** Mo. Chrom je karbidotvorný prvek tvořící karbidy s C. Může vytvářet speciální nebo komplexní karbidy (v tomto případě se jedná o karbidy souhrnně označované $M_{23}C_6$). Karbidy typu $M_{23}C_6$ jsou nežádoucí, neboť dochází k ochuzování matrice základního materiálu o Cr, čímž je snižována korozní odolnost. Proto jsou přidávány prvky jako Mo a V, neboť na C mají vyšší afinitu než Cr. Tyto karbidy jsou vysoce stábe (mají vysokou tepelnou odolnost), dále jsou velice jemné, tvrdé a neshlukují se do velkých konglomerátů. Při řezném procesu způsobují abrazivní opotřebení řezného nástroje. Samotný Vanad, který je v tomto materiálu zastoupen v množství menším než 0,3%, vytváří velmi stabilní karbidy odolné proti popouštění a zjemňující strukturu materiálu. $M_{23}C_6$ není tak tvrdý, rozpouští se. [49]

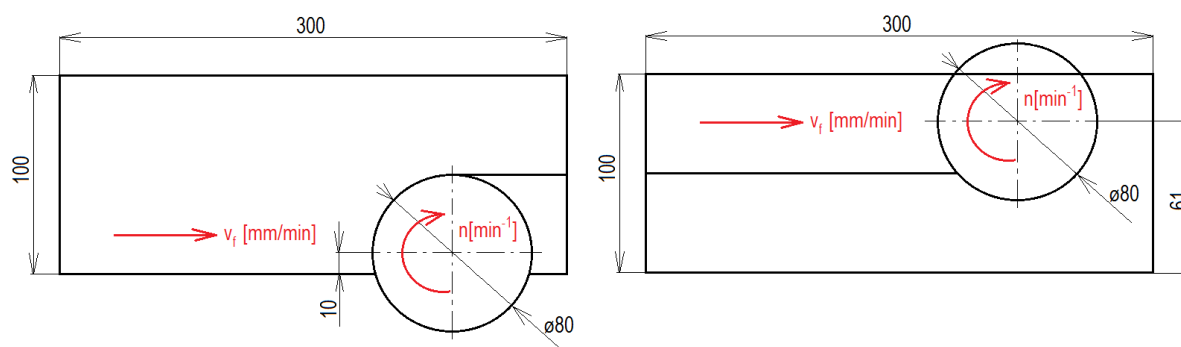
Tab. 5-1: Chemické složení oceli P91[51] a [52]

Prvek	C	Cr	Mo	Mn	V	Nb	Si	Ni	N	Al	P	S
Min [%]	0,08	8	0,85	0,3	0,18	0,06	0,2	-	0,03	-	-	-
Max [%]	0,12	9,5	1,05	0,6	0,25	0,1	0,5	0,4	0,07	0,04	0,02	0,05

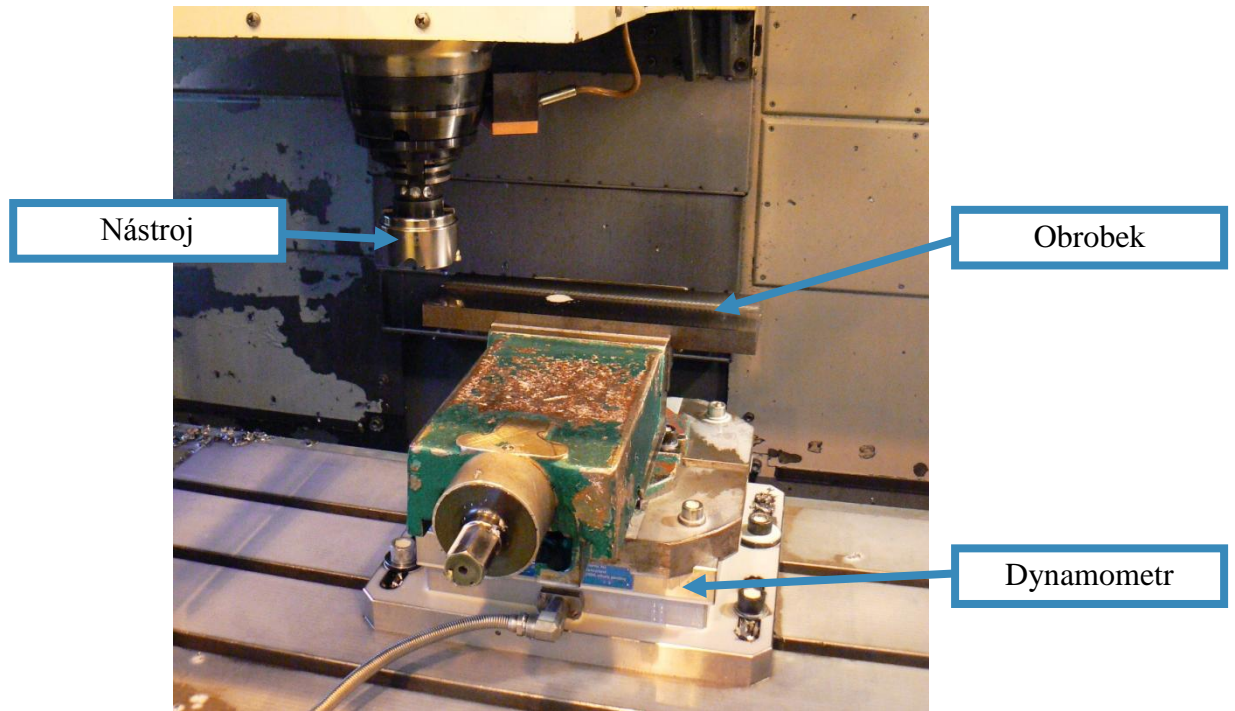
Z hlediska mechanických vlastností se jedná o ocel s nízkou mezí kluzu, ale vysokou houževnatostí. Tepelná vodivost $\lambda_{1,4903} = 26 \text{ W/mK}$ při 20°C a 30 W/mK při 500°C , což je v porovnání s uhlíkovou ocelí s 0,2 % C o polovinu nižší hodnota ($\lambda_{0,2\%C} \approx 50 \text{ W/mK}$). Nízká tepelná vodivost a vyšší houževnatost je spojena s intenzivním tepelným namáháním řezného břítu. Nevhodně zvolené řezné prostředí nebo podmínky mohou způsobit vznik tepelných trhlin, případně vylamování ostří břitové destičky. Dalším výsledovaným způsobem opotřebení je vznik nárůstku. Ten se obvykle tvoří v intervalu řezných rychlostí, jejichž hodnota je ovlivněna faktory, mezi které patří: obráběný materiál, řezný materiál, posuvová rychlost, řezné prostředí apod. Pro ocel P91 obráběnou nástrojem IN2004 se tato hodnota pohybuje v určité oblasti kolem $v_c = 226 \text{ m/min}$ při posuvu 4,5 mm/zub. [49]

Bližší specifikace obráběného materiálu P91 je uvedena v příloze P3.

Zkušební obrobek byl ve formě kvádrů o rozměrech obráběné plochy 300 x 100 mm. Záběrové podmínky, které byly použity v průběhu veškerých experimentálních činností, jsou znázorněny v obr. 5-4. Nastavení experimentu je v obr. 5-5.



Obr. 5 - 4: Schéma záběrových podmínek



Obr. 5 - 5: Nastavení experimentu

6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

6.1 TEST ŘEZIVOSTI ORIGINALNÍ VBD IN04S

Prvním krokem bylo nalezení vhodných řezných podmínek, dle kritérií uvedených v kapitole 5.4, pro nástroj s označením IN04S. Posuv, axiální a radiální hloubka řezu byly konstantní. Řezná rychlost byla volena z intervalu $140 \div 230$ m/min. Nastavení experimentu včetně řezných podmínek je uvedeno v Tab. 6-1.

Tab. 6 - 1: Řezné podmínky pro frézování nástrojem IN04S

a_p [mm]	0,02				
a_e [mm]	50				
f_z [mm]	4,5				
v_c [m/min]	140	160	180	200	230
	záplavové chlazení				
	sousledné frézování				

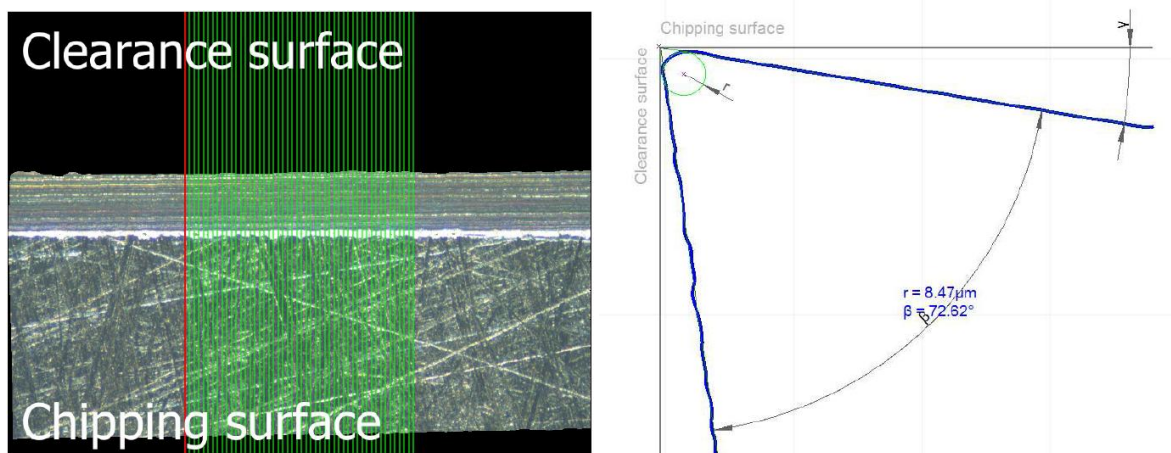
Sousledné frézování a vnější záplavové chlazení bylo zachováno s ohledem na výsledky předcházející experimentální činnosti.

6.1.1 Analýza mikro-geometrie řezného břitu IN04S

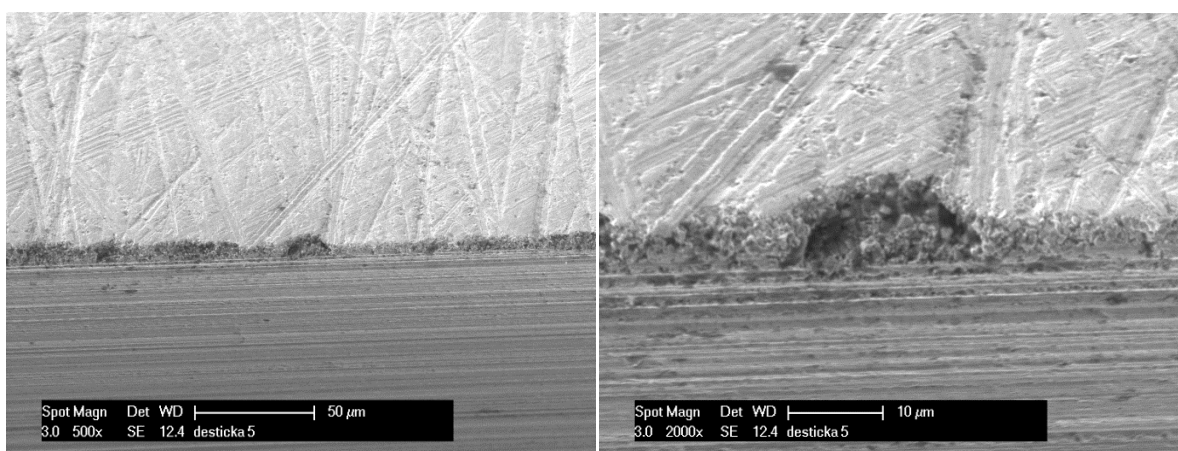
Mikro-geometrie řezného nástroje byla měřena opticko-skenovacím mikroskopem IFM G4 od společnosti Alicona. Na obr. 6-1 je možné vidět 3D model naskenovaného řezného břitu a jeden z řezů v rovině normálové. Měřenými parametry byly poloměr zaoblení ostří, faktor symetričnosti a hodnota drsnosti ostří. V Tab. 6-2 jsou uvedeny ke každému parametru naměřené hodnoty, a to ve formě intervalu. Poloměr zaoblení ostří byl taktéž měřen kontaktní metodou, konkrétně na vysoce přesném profiloměru/drsnoměru Hommel Etamic T8000. Bohužel, s ohledem na velmi ostrý přechod mezi čelem a hřbetem nástroje a zároveň velmi malým měřeným r_n , nebylo touto metodou možné naměřit relevantní výsledky, jež by posloužily ke kontrole hodnot naměřených na přístroji IFM G4. Jedinou kontrolou může být, že veškeré nástroje, jež byly upravovány ve společnosti Hofmeister, s.r.o., byly opětovně přeměřeny na přístroji IFM G4. Jelikož společnost dodala upravené nástroje včetně provedených měření, bylo možné srovnat dosažené výsledky. Rozdíl v naměřených hodnotách se lišil do 10%.

Tab. 6 - 2: Parametry břitu IN04S

r_n [μm]	6,6 \div 8,5
K [-]	0,98 \div 1,1
Rsa [μm]	0,583 \div 0,837
Rsz [μm]	1,968 \div 2,601



Obr. 6 - 1: Řezný břit a hodnota r_n měřená na IFM G4



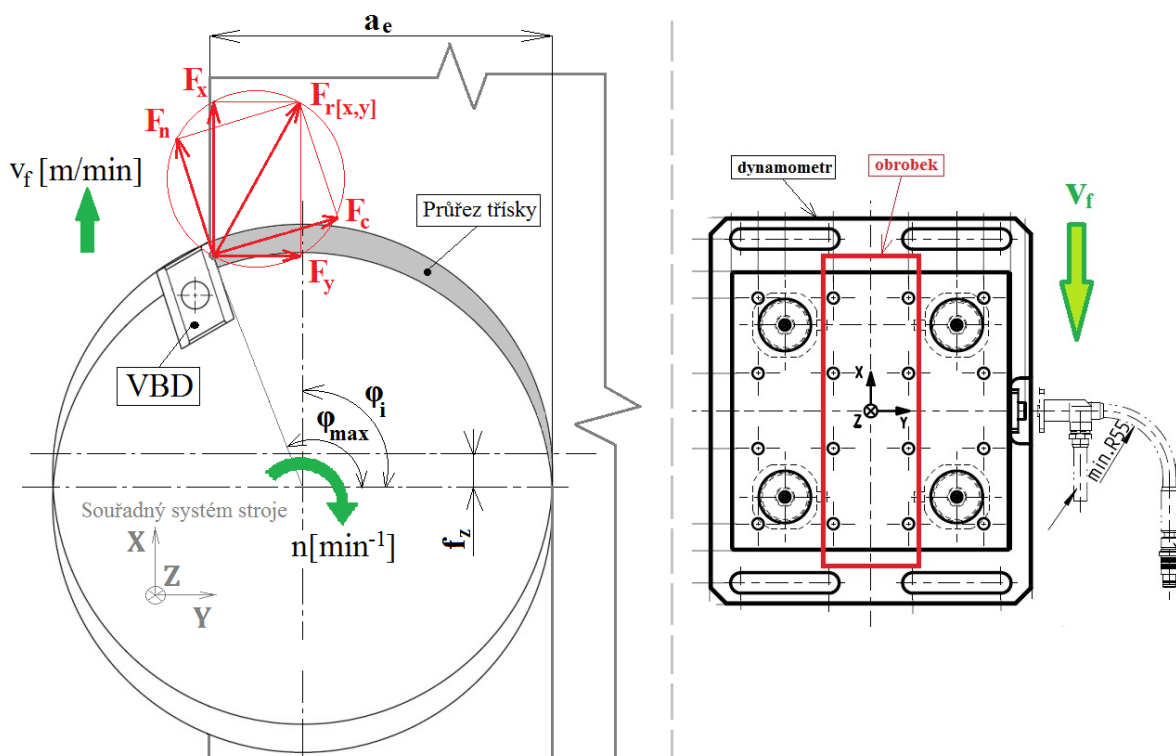
Obr. 6 - 2: Břit VBD IN04S 500x a 2000x zvětšené – elektronový mikroskop

Detail břitu IN04S je možné vidět na *obr. 6-2*. Ostří je od výrobce nástrojů (společnosti Ingersoll) upravováno technologií suchého pískování. Na samotném řezném břitu jsou patrné stopy po předchozí technologii, tzn. po broušení. Na čele nástroje jsou stopy rovnoběžné s ostřím, na hřbetě jsou kolmé na ostří. Ostří obsahuje mikro-defekty. Hodnota r_n leží v intervalu $6,6 \div 8,5 \mu\text{m}$ a byla měřena na vybraných vyměnitelných břitových destičkách vždy ve vzdálenosti 3 mm od špičky. U VBD IN04S se počítá s depozicí tenké vrstvy TiAlN, jejíž tloušťka činí přibližně $4 \mu\text{m}$. Posléze se poloměr zaoblení ostří pohybuje v intervalu $10,7 \div 13,1 \mu\text{m}$, což je reálná hodnota naměřená na nástroji IN2004³.

³ IN04S s povlakem TiAlN je označován jako IN2004

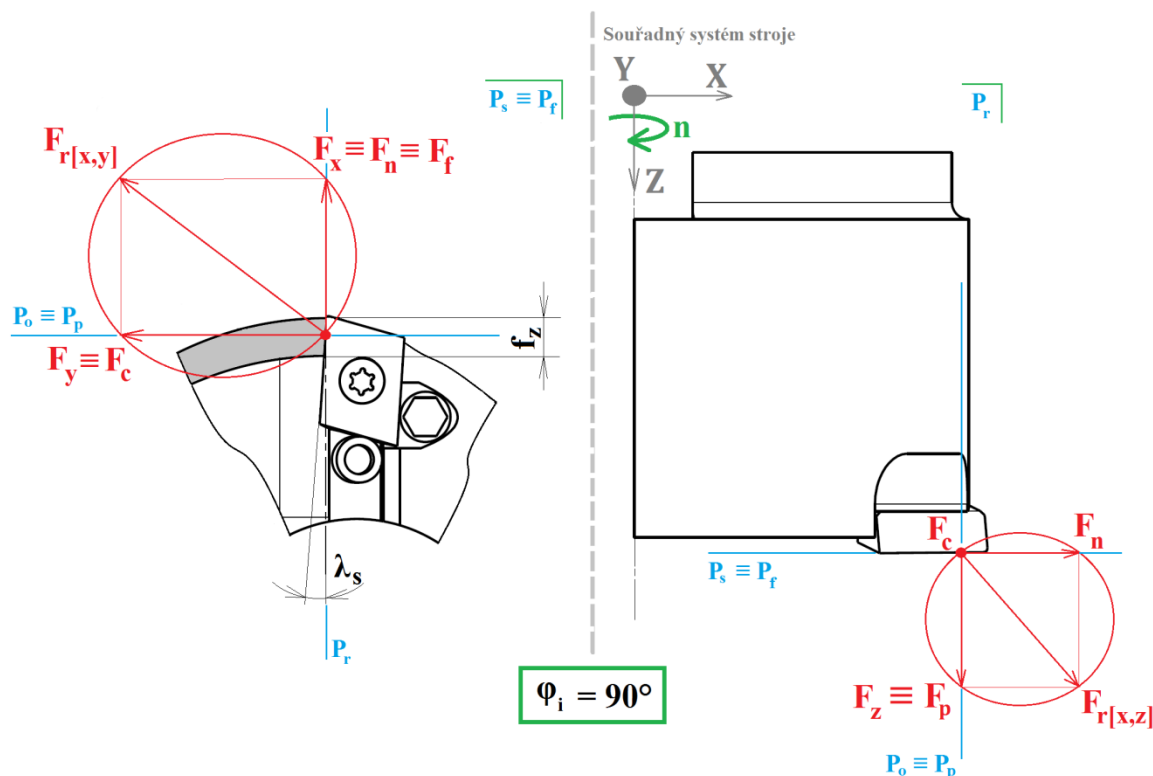
6.1.2 Analýza naměřených hodnot - řezné síly

Mezi sledované a vyhodnocované parametry řezného procesu (viz kap. 5.2 Cíle disertační práce) patří řezné síly. Pro analýzu a následné hodnocení silového zatížení řezného břitu nástroje je nezbytná znalost velikosti jednotlivých složek řezných sil a také jejich změny se změnou parametrů procesu. Na obr. 6-3 jsou zobrazeny záběrové podmínky při čelním frézování s osou rotace nástroje vzdálenou 10 mm od hrany obrobku a umístění dynamometru na obrobku. Jedná se tedy o sousledné frézování, kdy v okamžiku prvního kontaktu nástroje s obrobkem není dosaženo maximální tloušťky odřezávané vrstvy ($\varphi_{max} = 104^\circ$).



Obr. 6 - 3: Rozklad řezných sil na řezném břitu - $\varphi_{max} = 104^\circ$ a umístění obrobku na dynamometru

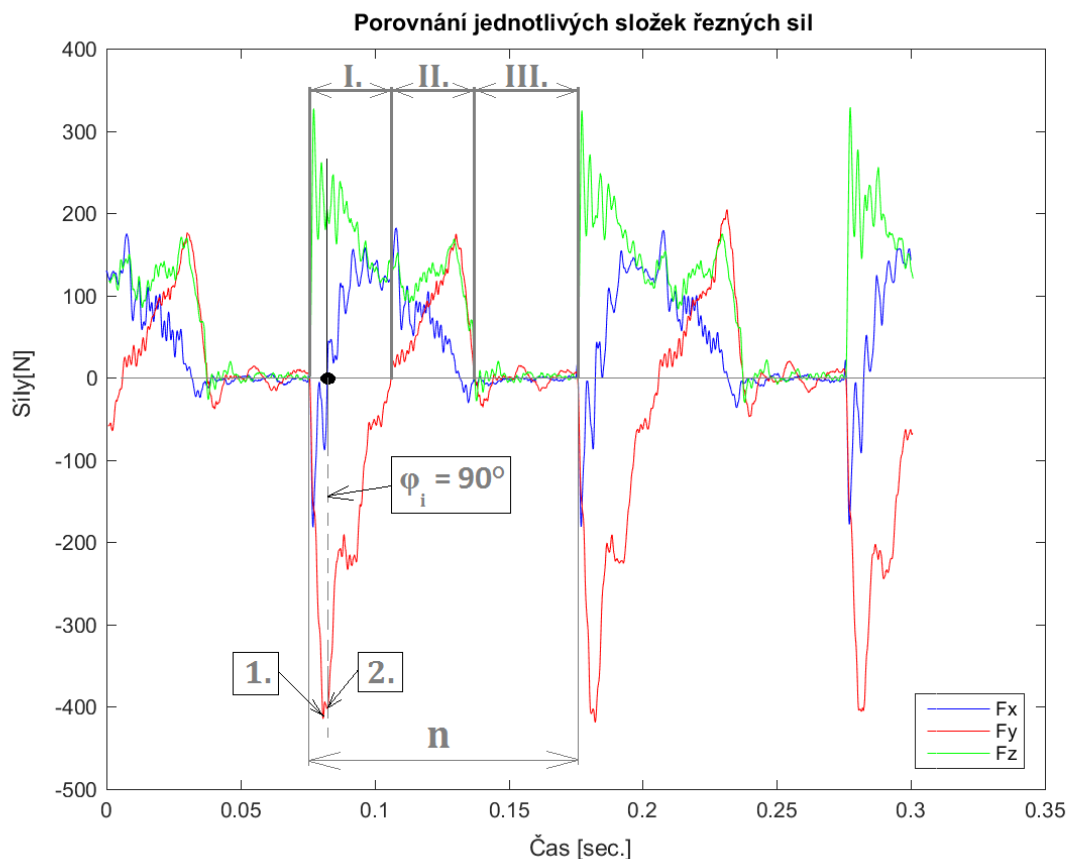
Na následujícím obrázku (*obr. 6-4*) je proveden podrobnější rozklad řezných sil v okamžiku, kdy úhel záběru φ_i je roven 90° , tzn. v místě, kdy je dosaženo maximální tloušťky odřezávané vrstvy.



Obr. 6 - 4: Rozklad řezných sil na řezném břitu - $\varphi_i = 90^\circ$

Pro stanovení určitých závěrů je nutné detailně prozkoumat průběh jednotlivých složek řezných sil, a to v rámci jedné otáčky nástroje (viz *obr. 6-5*). V záznamu jsou vyznačeny tři oblasti tak, aby bylo možné jednoznačně identifikovat polohu nástroje s ohledem na *obr. 6-3* vlevo. V okamžiku prvního kontaktu nástroje s obrobkem („nárazu“) dochází ke skokovému nárůstu všech měřených složek řezných sil. Průběh síly F_y má dva vrcholy, přičemž první odpovídá zmiňovanému nárazu, avšak je časově posunutý o 0,0034 sec. oproti silám F_x a F_z . Důvod časového posunu lze hledat jak v měřicí soustavě (setrvačnost soustavy a crosstalk), tak v samotné podstatě obrábění.

Dalším milníkem je okamžik dosažení úhlu záběru $\varphi_i = 90^\circ$. Síla F_x je rovna nule a F_y dosahuje svého maxima (druhý vrchol síly F_y). Oblast označená římskou číslicí I. ohraničuje dobu, po kterou je nástroj v záběru (oblast řezu). Oblast II. odpovídá přejezdu nástroje přes obrobenou plochu. Dochází zde k tření nástroje, případně k „dořiznutí“ materiálu obrobku, který zůstal na obrobené ploše po předchozím přejezdu nástroje. Poslední fází je poloha nástroje mimo obráběnou a obrobenou plochu, přičemž je patrná drobná oscilace síly kolem 0N. Jelikož je obrábění dynamický proces, tak drobná oscilace okolo 0N může být zapříčiněna setrvačností celé soustavy, případně vibracemi.



Obr. 6 - 5: Záznam průběhu jednotlivých složek řezných sil originální VBD pro $v_c = 230 \text{ m/min}$

V následujícím 3D grafu (obr. 6-6) je znázorněn vliv velikosti řezné rychlosti a objemu odebraného materiálu na celkové silové zatížení F v okamžiku, kdy je dosaženo maximální tloušťky odřezávané vrstvy ($\varphi_i = 90^\circ$). Tento vztah je popsán matematickým vzorcem. S ohledem na charakter průběhu naměřených hodnot a dvou proměnných lze vzájemný vztah popsat funkcí:

$$F = c_f \times v_c^{n_F} \times V^{z_F} \quad (R. 2)$$

$$F = 5 \times v_c^{0,855} \times V^{0,070} \quad (R. 3)$$

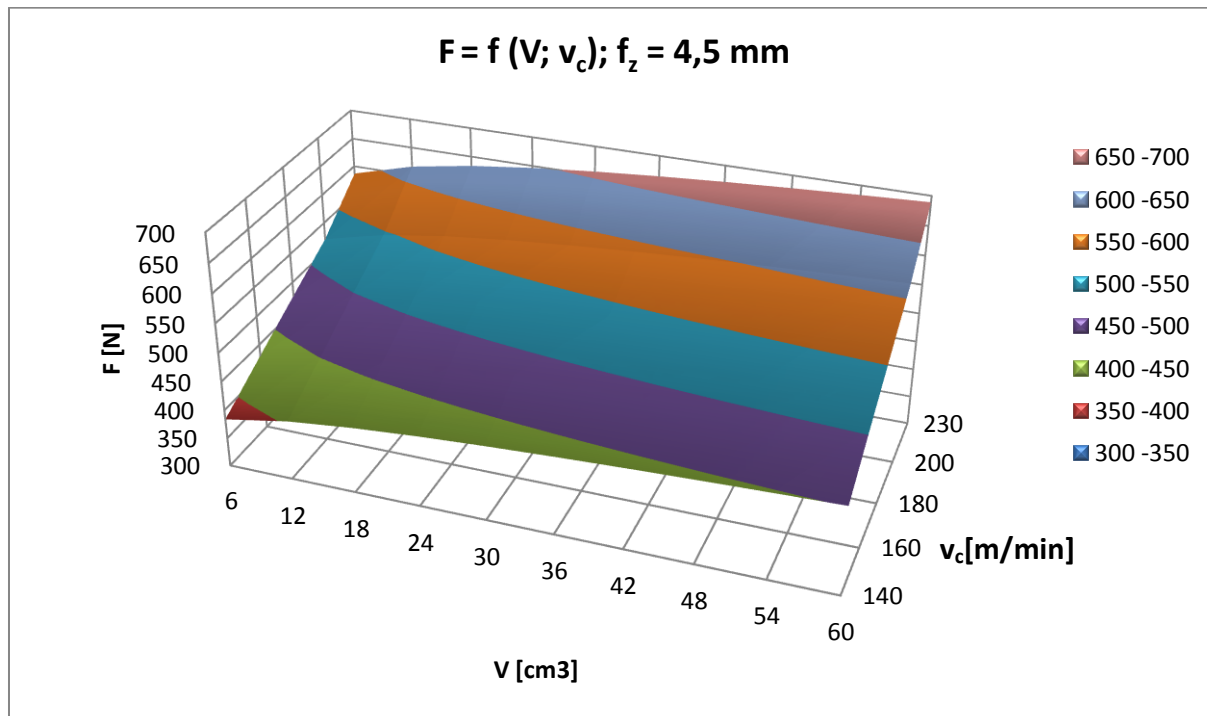
Stejným způsobem je možné popsat i vliv uvedených faktorů (v_c a V) na jednotlivé složky řezné síly:

$$F_f = 2,802 \times v_c^{0,828} \times V^{0,094} \quad (R. 4)$$

$$F_p = 0,066 \times v_c^{1,552} \times V^{0,165} \quad (R. 5)$$

$$F_c = 7,094 \times v_c^{0,726} \times V^{0,105} \quad (R. 6)$$

Hodnoty řezných sil byly zpracovány metodou mnohonásobné regrese⁴. Naměřený soubor bodů byl proložen přímkou v logaritmickém vyjádření, došlo k tzv. vyrovnání závislostí. Získané vzorce byly statisticky testovány na pravděpodobnostní hladině 95%. Výsledky testů jsou uvedeny v příloze P7.



Obr. 6 - 6: Vliv řezné rychlosti a objemu odebraného materiálu na celkové silové zatížení

Na základě podrobného rozboru záznamu průběhu jednotlivých složek řezných sil (obr. 6-5) a vykreslení závislostí (obr. 6-6 a příloha P7) je možné stanovit následující závěry:

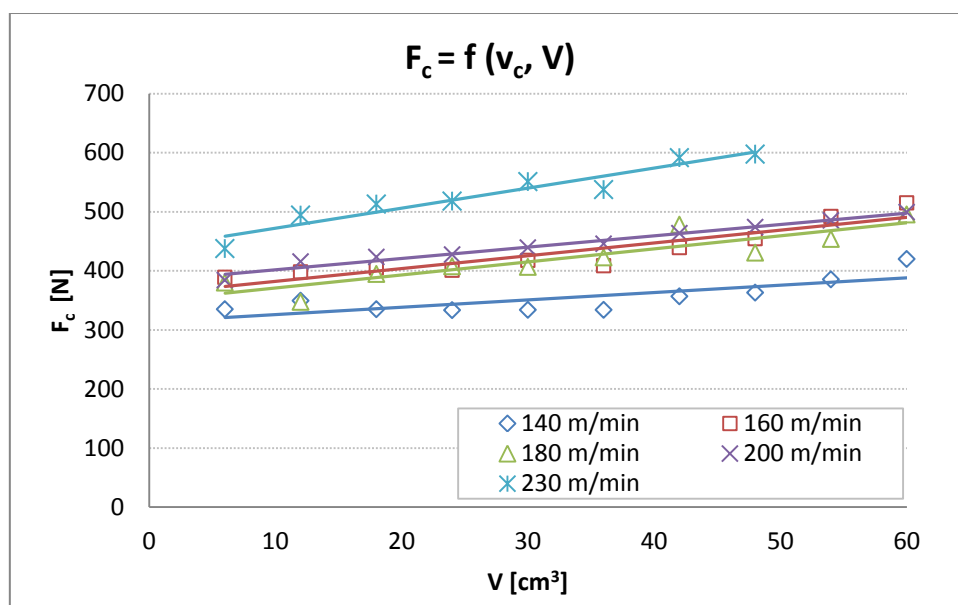
- když $\varphi_i = 90^\circ$, tak $F_y \equiv F_c = \text{maximální}$
- když $\varphi_i = 90^\circ$, tak F_x
- když $\varphi_i = 90^\circ$, tak celkové silové zatížení řezného břitu:

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

- když $\varphi_i = 90^\circ$, tak $F_c > F_f$ a $F_c > F_p$
- F_x, F_y a F_z nedosahují nulové hodnoty v kvadrantu I. a II.
- $F_z \equiv F_p$ zahrnuje řezání a tření → této složce je nutné věnovat pozornost

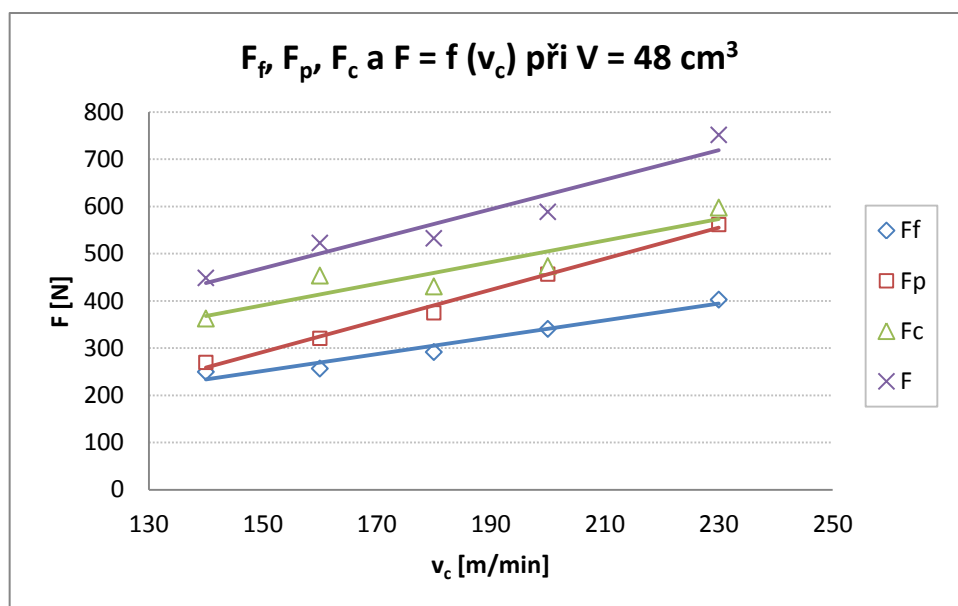
⁴ Mnohonásobná regrese je rozšířením jednoduché regrese pro případy, kdy bereme v úvahu více než jednu nezávislou proměnnou X (jedná se o techniku zkoumající současné působení několika proměnných X a Y). [73]

V grafu na *obr. 6-7* je znázorněn vliv změny řezné rychlosti na velikost řezné síly F_c . Se zvyšující se řeznou rychlostí dochází k jejímu nárůstu, což je v rozporu s obecnými teoretickými poznatky. *J. Řehoř* [59] ve své disertační práci uvádí, že charakter průběhu řezných sil v závislosti na v_c je možné rozdělit do pěti stádií, přičemž první stádium se vyznačuje vzestupnou tendencí F_c . „Velikým objem plastické deformace se zvyšující se deformační rychlostí a bez významného vlivu tepelného odpevňování jsou hlavním důsledkem celkového zvyšování řezných sil [59]“ v I. stádiu. Hranice I. stádia, tj. oblasti nárůstu F_c s v_c , je závislá na obráběném a řezném materiálu, technologii obrábění, geometrii nástroje apod. S vyšší řeznou rychlostí se zároveň zvyšuje opotřebení řezného břitu a tím se mění jeho mikro-geometrie, což je další faktor způsobující nárůst silové zatížení nástroje. Nejnižší hodnoty řezné síly bylo dosaženo při řezné rychlosti 140 m/min a naopak nejvyšší hodnoty při řezné rychlosti 230 m/min. Naměřené body, pro jednotlivé řezné rychlosti, jsou ve všech případech proloženy přímkou. Při nejvyšší v_c byla vyšší variabilita rozpětí naměřených hodnot, a proto má proložená funkce nižší spolehlivost v porovnání s ostatními průběhy. Zároveň je patrné, že při dosažení objemu odebraného materiálu 48 cm³ byl experiment ukončen. V tomto okamžiku bylo na řezném břitu naměřeno opotřebení, které překračovalo kritériální hodnotu $KB_{krit.}$



Obr. 6 - 7: Vliv řezné rychlosti a objemu odebraného materiálu na F_c pro originální IN04S

Dalším krokem je vyjádření interakce mezi řeznou rychlostí a měřenými složkami řezné síly při $V = 48$ cm³. Z grafu na *obr. 6-8* je patrné, že složky F_f a F_c a zároveň F_p a F mají téměř stejnou směrnici. Směrnice přímky síly F_p je vyšší než síly F_c , tzn., že vliv pasivní složky řezné síly (F_p) je výraznější než řezné síly (F_c). Důvodem je velikost opotřebení na hřbetě nástroje (VB_{max}), tj. vznik „plošky“, která zapříčinila vyšší pasivní odpor (tření) mezi nástrojem a obráběnou plochou. Analýza opotřebení řezného břitu je v následující kapitole (*kapitola 6.1.3*).



Obr. 6 - 8: Vliv řezné rychlosti na velikost jednotlivých složek řezné síly a celkové silové zatížení při objemu odebraného materiálu 48 cm^3

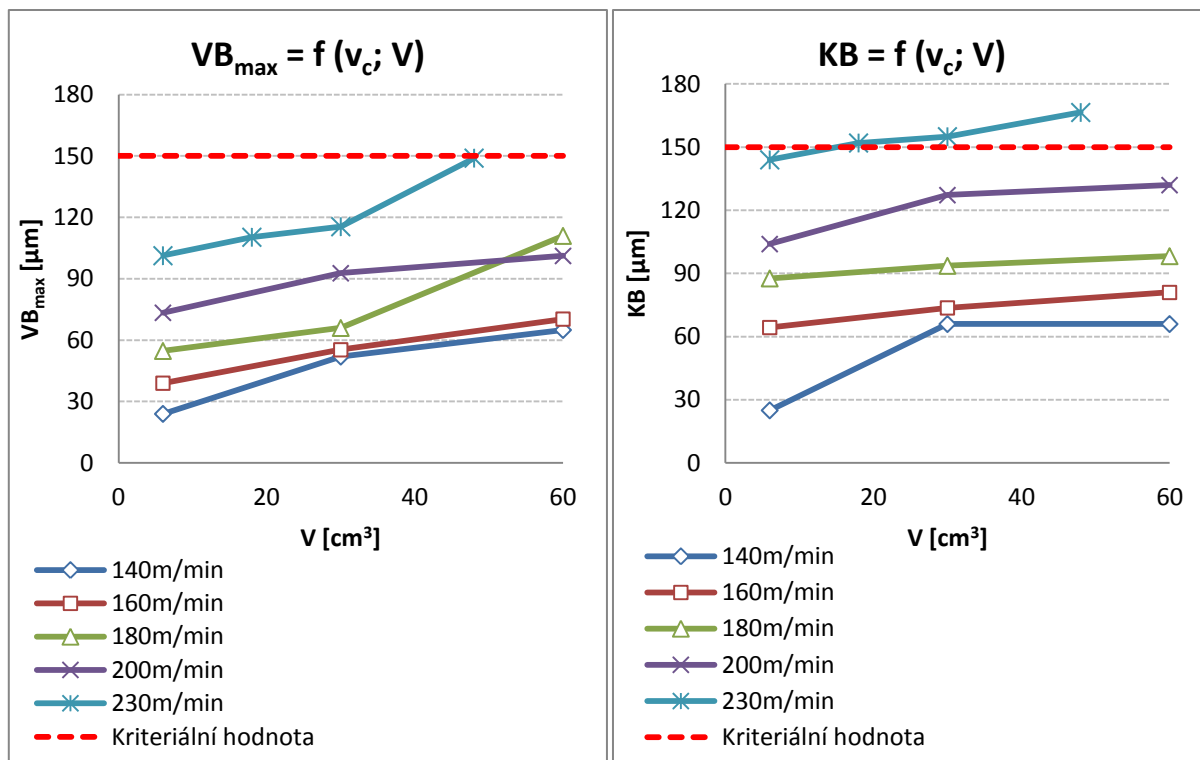
6.1.3 Analýza naměřených hodnot - opotřebení

Průměrné hodnoty opotřebení jak na hřbetě, tak na čele řezného břítu, jsou uvedeny v grafu na obr. 6-9. Jako míra centrální tendence (zmiňovaná průměrná hodnota) byl použit *medián*. Celkový počet náměrů, pro jednu řeznou rychlost, byl tři až pět (v závislosti na opakovatelnosti naměřených výsledků). Z průběhů opotřebení břítu v závislosti na čase (obr. 6-9) a monitorování způsobu opotřebení (obr. 6-10) vyplývají následující skutečnosti:

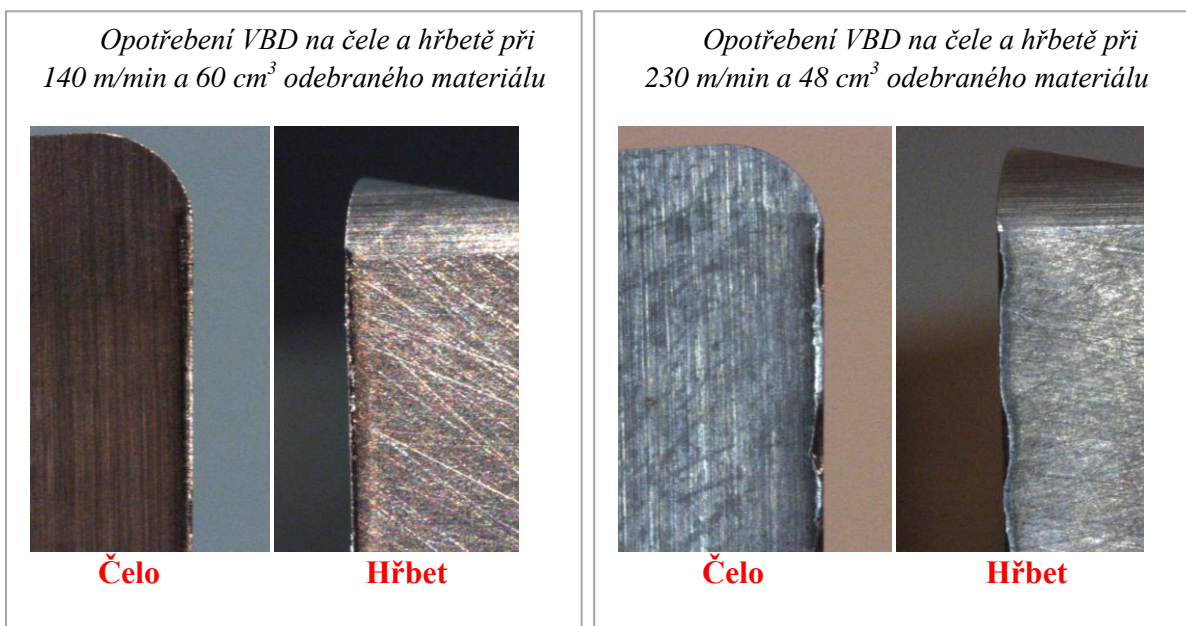
- při $v_c = 140 \text{ m/min}$ se řezná hrana opotřebovala abrazivním způsobem,
- s navyšující se řeznou rychlostí docházelo k vydrolení částí řezného břítu, které bylo při $v_c = 230 \text{ m/min}$ nejintenzivnější (na obr. 6-10 vpravo je patrné vydrolení řezné hrany podél celého ostří),
- vydrolení zapříčinilo vznik „žlábků“⁵ na ostří a zároveň změnilo geometrii řezného nástroje,
- vznik „žlábků“ na ostří byl v případě $v_c = 230 \text{ m/min}$ zaznamenán již po 6 cm^3 objemu odebraného materiálu,
- velikost a způsob opotřebení měly výrazný vliv jak na drsnost obrobeného povrchu, tak na jednotlivé složky řezných sil,
- opotřebení na hřbetě ovlivnilo především sílu F_p .

Z obr. 6-9 je zároveň patrné, že k překročení kritériální hodnoty KB_{krit} došlo, v případě $v_c = 230 \text{ m/min}$, již po $V = 14 \text{ cm}^3$. Experimentální obrábění nebylo přerušeno, neboť naměřená hodnota KB byla $5 \mu\text{m}$ nad hranicí kritéria. Jelikož opotřebení řezného břítu je měřeno na dílenském mikroskopu *Multicheck PC500* s přesností měření na $5 \mu\text{m}$, testy řezivosti pokračovaly až do okamžiku, kdy na čele nebo hřbetě řezného břítu bylo naměřeno více jak $155 \mu\text{m}$.

⁵ „žlábek“ je míněn způsob přechodu mezi čelem a hřbetem řezného břítu



Obr. 6 - 9: Vliv řezné rychlosti na opotřebení řezného břitu nástroje IN04S



Obr. 6 - 10: Opotřebení vyměnitelných břitových destiček při proměnných v_c

6.1.4 Analýza naměřených hodnot - drsnost obrobeného povrchu

Mezi vyhodnocované parametry patří **Ra** (střední aritmetická hodnota drsnosti) a **Rz** (maximální výška profilu). Drsnost obrobeného povrchu byla měřena dle normy ČSN EN ISO 4287 a výběr filtru profilu (cut-off) byl proveden dle ISO 4288:1998 a ISO 3274:1998 (viz příloha P5).

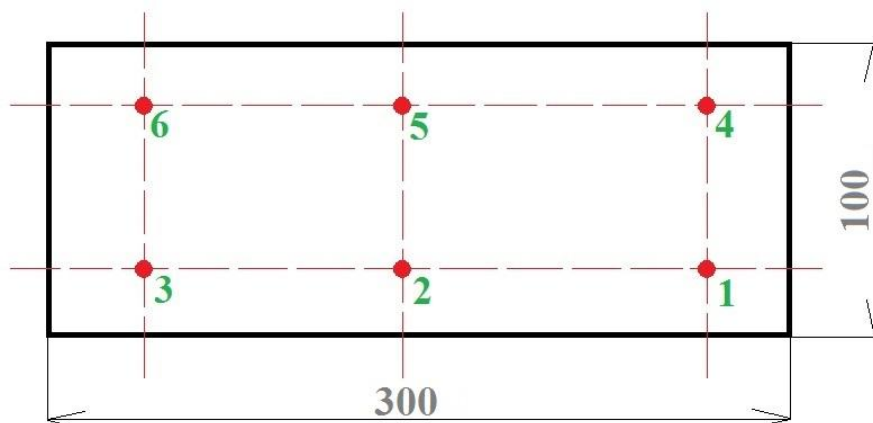
Jak již bylo zmíněno, v této práci budou vyhodnocovány dva parametry (**Ra** a **Rz**). Parametr **Ra** je téměř v 92% všech strojírenských podniků předepisován na výkresy bez dalších parametrů drsnosti. Jeho vypovídací schopnost je nízká, jelikož nereaguje dostatečně citlivě na extrémní výšky hrotů a hloubky rýh profilu. Zároveň je předepisován na výkresové dokumentaci společnosti *Doosan Škoda Power*. Mezi parametry **Ra** a **Rz** existuje přibližný převodní vztah, a to:

- 1:4 u periodických povrchů (soustružených, frézovaných, hoblovaných apod.). Z hlediska technologického procesu můžeme tento povrch označit za „hrubší“.
- 1:8 až 1:10 u aperiodických povrchů (leštěné, lapované, broušené apod.). Z hlediska technologického procesu lze takovéto povrchy označit za velmi jemné. [54]

Pro měření parametrů obrobeného povrchu byl zvolen následující postup. Na obrobené ploše bylo zvoleno 6 míst náměru a v každém místě bylo měření 2x opakováno. Pro potřeby hodnocení **Ra** a **Rz** bylo tedy k dispozici 18 hodnot na jedné obrobené ploše. Jelikož experimenty byly minimálně 2x opakovány, je každý bod v grafu na *obr. 6-12 (str. 54)* vytvořen minimálně z 54 hodnot. Těchto 54 hodnot bylo matematicko-statisticky (dále „M-S“) analyzováno.

Při M-S analýze bylo zjišťováno, zda jsou naměřené hodnoty (**Ra** a **Rz**) závislé na místě náměru. Jednotlivá místa náměru jsou schematicky zobrazena na *obr. 6-11*, přičemž:

- **1 a 4** – vstupu nástroje do řezu. Místo, kde mohlo docházet k odtlačování nástroje, neboť do místa řezu nebylo najížděno po kružnici.
- **2 a 5** – plynulý řez.
- **3 a 6** – výjezd z řezu. Místo, kde mohlo docházet k uvolňování odtlačovaného nástroje a nástroj mohl zabírat svou zadní stranou.



Obr. 6 - 11: Náměrná místa na obrobené ploše pro vyhodnocovanou drsnost **Ra** a **Rz**

Pro analýzu naměřených dat byla použita jednofaktorová analýza rozptylu (ANOVA). Statistické hypotézy byly testovány na hladině významnosti 5% ($\alpha = 0,05$). Vzorový příklad zpracování dat je proveden pro $v_c = 200$ m/min a $V = 6$ cm³ (viz tab. 6-3 a tab. 6-4). Stanovení statistických hypotéz:

- nulová, tj. $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_i$ (naměřené hodnoty **nejsou** závislé na místě náměru)
- alternativní, tj. $H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \dots \neq \mu_i$ (naměřené hodnoty **jsou** závislé na místě náměru)

Tab. 6 - 3: Naměřená R_a v jednotlivých místech náměru při $v_c = 200$ m/min a $V = 6$ cm³

	Místo náměru					
	1	2	3	4	5	6
R_a [μm]	0,495	0,474	0,458	0,391	0,41	0,374
	0,468	0,56	0,342	0,445	0,451	0,422
	0,368	0,422	0,396	0,556	0,462	0,476

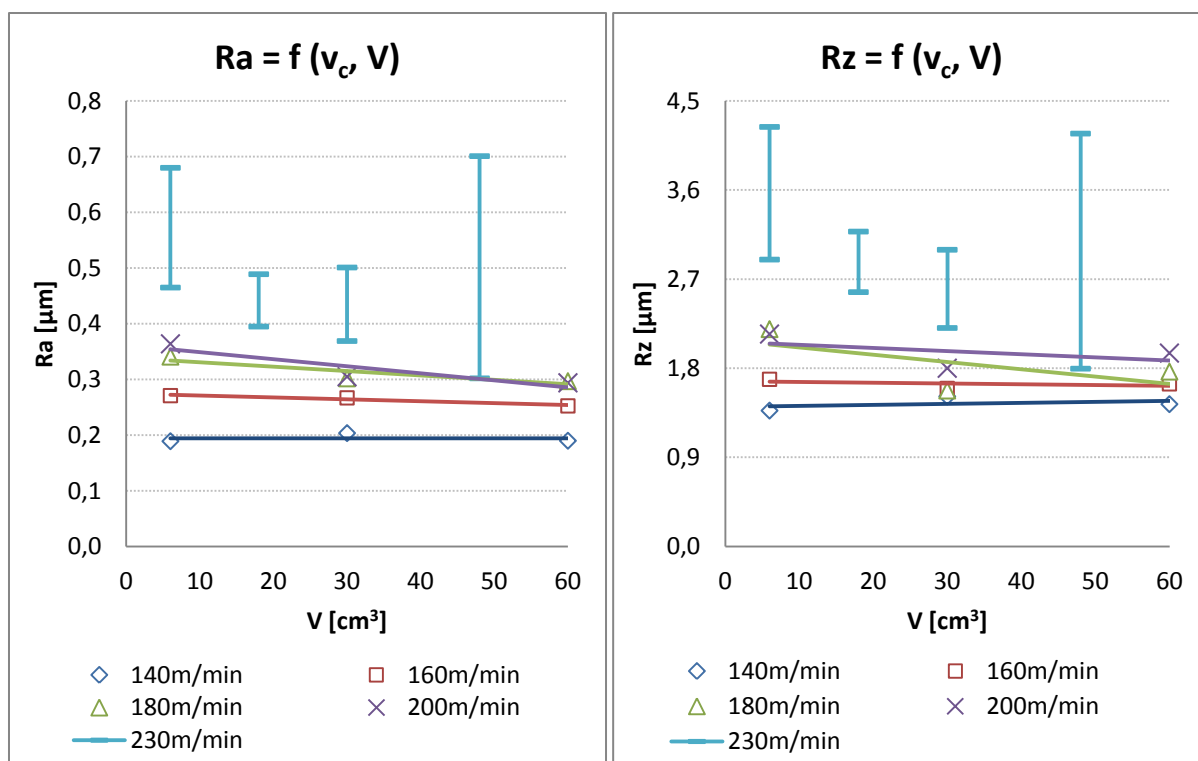
Z výsledků v tab. 6-4 je patrné, že *Hodnota P* je větší než zvolená hladina významnosti, tj. $0,627 > 0,05$. Nulovou hypotézu tedy nemůžeme zamítnout, tzn., že není významný rozdíl mezi hodnotami naměřenými v jednotlivých náměrných místech. Z toho vyplývá, že všechny hodnoty naměřené na obrobené ploše, za daných řezných podmínek a objemu odebraného materiálu, mohou být považovány za jeden soubor dat, který poslouží k interpretaci výsledků v grafu na obr. 6-12. Stejným způsobem byla zpracována data pro všechny testované řezné rychlosti, viz Tab. P5 v příloze P6.

Tab. 6 - 4: ANOVA dat R_a při 200 m/min

Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	0,013691	5	0,002738	0,710151	0,627327	3,105875
Všechny výběry	0,04627	12	0,003856			
Celkem	0,059961	17				

Analýza rozptylu parametru R_a při řezné $v_c = 230$ m/min zamítla nulovou hypotézu, a to v 7-mi případech z jedenácti (Tab. P5, příloha P6), tzn., že každé místo náměru lze považovat za samostatný soubor dat, ze kterého vyplývají následující stanoviska:

- Jako míru centrální tendence, pro prezentaci dat v bodovém grafu, nelze použít průměr ani medián. Jediným řešením je vyjádření ve formě variačního rozpětí.
- Do budoucího hodnocení kvalitativních parametrů obrobené plochy vždy zahrnout ANOVA.
- Zaměřit se na pasivní složku řezné síly a kontrolovat tvar vznikající třísky.



Obr. 6 - 12: Vliv řezné rychlosti na drsnost obroběného povrchu

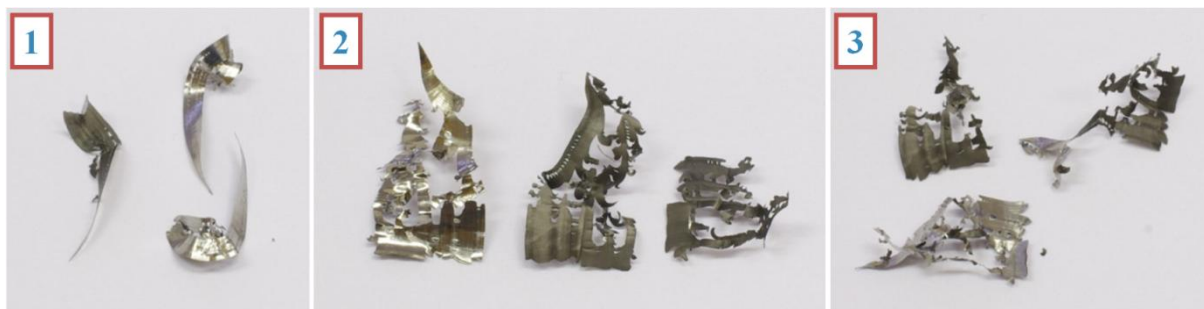
Jak je vidět v grafu na obr. 6-12:

- Průběhy drsností **Ra** odpovídají průběhům drsností **Rz**. Převodní vztah mezi těmito parametry je v rozmezí 1:6 až 1:7,5.
- Nejnižších hodnot drsností obroběného povrchu je dosaženo při nejnižší řezné rychlosti.
- Se vzrůstající v_c narůstají jak hodnoty **Ra**, tak **Rz**.
- Naměřené hodnoty drsností byly proloženy přímkou (kromě $v_c = 230$ m/min), která je v případě $v_c = 140$ m/min téměř rovnoběžná s osou **V**.
- Drsnost **Ra** pro $v_c = 230$ m/min je vykreslena v podobě variačního rozpětí ($R = x_{max} - x_{min}$) pro jednotlivé hodnoty **V**.
- Průběhy drsností **Ra** pro $v_c = 160, 180$ a 200 m/min mají klesající charakter, což lze vysvětlit vznikem „plošky“ na hřbetě břitu, jenž má hladící efekt.
- Výsledná kvalita obroběného povrchu je ovlivněna především typem a velikostí opotřebovaného řezného břitu → platí v rozsahu $v_c = 160 \div 200$ m/min.

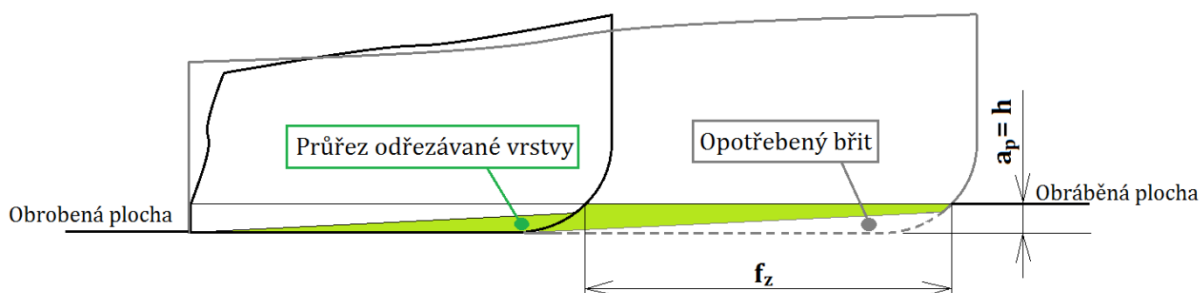
6.1.5 Analýza tvaru třísky

Na obr. 6-13 jsou znázorněny třísky, které byly odebrány při $v_c = 230$ m/min po $V = 6, 30$ a 48 cm³. Na tříse č. 1 je patrná perforace. Perforace třísky se objevovala vždy, když na řezném břitu došlo k vydrolení částí ostří. Třísky č. 2 a 3 mají naprosto rozdílný tvar od standardně vznikajících třísek. Třísky jsou mnohem širší a viditelně poškozené. Šířka těchto třísek činí 9 mm, tzn., že je dvojnásobkem hodnoty posuvu. Tuto skutečnost lze vysvětlit následovně. Při prvním řezu nedošlo díky vysokým hodnotám VB_{max} a **KB**

k odříznutí nastavené hloubky řezu, tj. 0,02 mm. Až při dalším řezu (posuvu nástroje v ose x o 4,5 mm) byl neopotřebovanou částí řezného břitu „doříznut“ zbytek materiálu. Tento cyklus se stále opakoval, přičemž docházelo k intenzivnějšímu opotřebení břitu v délce 9 mm⁶. Zmiňovaný proces je schematicky znázorněn na obr. 6-14. Pro porovnání tvaru vznikajících třísek, jsou připojeny i ty, jenž vznikaly při $v_c = 200$ m/min, viz obr. 6-15.



Obr. 6 - 13: Tvar vznikajících třísek při $v_c = 230$ m/min po 1) 6 cm³; 2) 30 cm³ a 3) 48 cm³

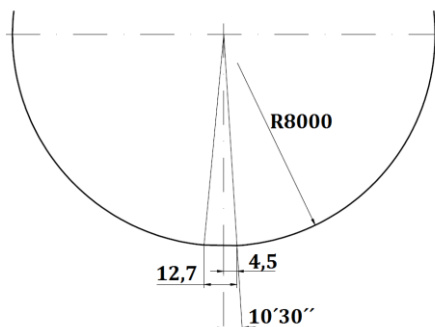


Obr. 6 - 14: Schéma vzniku třísek o šířce 9 mm



Obr. 6 - 15: Tvar vznikajících třísek při $v_c = 200$ m/min po 1) 6 cm³; 2) 30 cm³ a 3) 60 cm³

⁶ Ostří VBD je dlouhé 12,7 mm a rádius jeho vybroušení je 8000 mm. Úhel kruhové úseče na vzdálenosti 4,5 mm, činí 10'30'' → ostří lze považovat za přímkové.



6.1.6 Shrnutí dosažených výsledků pro originální VBD IN04S

Cílem kapitoly 6.1 bylo stanovit vhodné řezné podmínky, pro další experimenty, na základě výsledků prezentovaných v jednotlivých podkapitolách. Pro přehlednost a jednoznačnost volby řezné rychlosti je vytvořena porovnávací tabulka (viz. tab. 6-5), ze které vyplývá, že další experimentální činnost bude realizována při $v_c = 200$ m/min. Ostatní parametry řezného procesu (f_z , a_e , a_p apod.) zůstanou konstantní.

Tab. 6 - 5: Porovnání dosažených výsledků na základě kritériálních podmínek

	$v_c = 140$ m/min	$v_c = 160$ m/min	$v_c = 180$ m/min	$v_c = 200$ m/min	$v_c = 230$ m/min
Dodržení kritéria Ra	✓	✓	✓	✓	✓
Dosažení požadovaného V	✓	✓	✓	✓	✗
Dodržení VB_{max_krit}	✓	✓	✓	✓	✗
Dodržení KB_{krit}	✓	✓	✓	✓	✗
Šířka třísky $\leq f_z$	✓	✓	✓	✓	✗

Hlavní poznatky kapitoly 6.1 je možné shrnout do následujících bodů:

- **čím $\uparrow v_c$ tím $\uparrow F_c$.** Za konstantních řezných podmínek by se změnou řezné rychlosti měla F_c zůstat konstantní (platí pro nižší hodnoty v_c , při vyšších hodnotách v_c je F_c klesající). Jediným rostoucím parametrem by měl být příkon obráběcího stroje. Nárůst F_c se změnou v_c (Obr. 6 - 8, str. 50) lze přisuzovat vlivu velikosti plastické deformace, téměř nulovému vlivu tepelného odpevňování a opotřebení, které měnilo skutečný tvar řezného břitu.
- **čím $\uparrow v_c$ tím se mění způsob opotřebení.** Při nižší v_c docházelo k rovnoměrnému abrazivnímu opotřebení, které postupně přecházelo k vydrolování částí řezného břitu. Vydrolené ostří je, během řezného procesu, možné identifikovat na tvaru vznikající třísky – vznikají perforované třísky.
- **čím $\uparrow v_c$ tím $\uparrow Ra$.** Opotřebení řezného břitu nástroje mělo přímý vliv na drsnost obrobeného povrchu. Průběhy drsností, pro jednotlivé v_c , však mají klesající charakter, což lze vysvětlit vznikem „plošky“ na hřbetě břitu, jenž má hladící efekt. M-S analýza dat pro $v_c = 230$ m/min prokázala, že na obrobené ploše existují 3 rozdílná místa, která z hlediska dalšího zpracování nelze považovat za jeden soubor.
- **důležitost monitorování tvaru vznikajících třísek.** Z tvaru třísek je možné vyvozovat stav břitu a zároveň vysvětlit důležité momenty týkající se vyhodnocování dat.

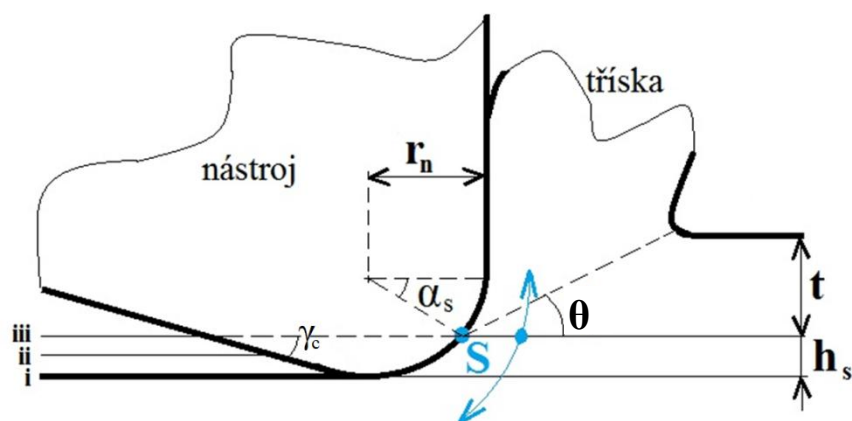
6.2 TEST ŘEZIVOSTI UPRAVENÉ VBD S PROMĚNNÝM POLOMĚREM ZAOBLENÍ OSTŘÍ (r_n)

Dalším krokem je určení vlivu velikosti r_n na vybrané parametry řezného procesu. Dosažené výsledky byly srovnány s referenčním nástrojem, tj. nástroj, jehož funkční plochy jsou pouze přebroušeny. Před samotnou volbou jednotlivých hodnot r_n byla provedena literární rešerše, zabývající se poměrem tloušťky odřezávané vrstvy a poloměrem zaoblčení ostří. Shrnutí rešeršních výsledků je uvedeno v následující kapitole (*kapitola 6.2.1*).

6.2.1 Tloušťka odřezávané vrstvy vs. poloměr zaoblčení ostří

Mirko-geometrii řezného břitu lze popsat parametry S_α , S_γ , r_n , Δr a K . Jedná se o materiál odstraněný z hřbetu a čela nástroje jednou z technologií uvedenou v *kapitole 3*. Tvar ostří je obvykle definován průměrnou hodnotou r_n . [5] Na ostří se nalézá stagnační bod S (někdy též nazývaný jako separační bod), viz *obr. 6-16*. Vzdálenost mezi obráběnou plochou a bodem S nazýváme *nedeforovaná tloušťka odřezávané vrstvy* (lze ji též nalézt v jiné literatuře pod označením *neodříznutá tloušťka odřezávané vrstvy*) značíme ji t (*undeformed or uncut chip thickness*). Vzdálenost mezi bodem S a obrobenou plochou je nazýván *tloušťka zatlačované vrstvy* (*ploughed thickness layer*) a je značena h_s . [4] Bod S představuje bod dělení materiálu. Část materiálu odchází po čele ve formě třísky a druhá část materiálu je zatlačována do obrobeného povrchu. Z tvaru ostří a hodnoty h_s lze dopočítat objem materiálu, který je zatlačován do obrobeného povrchu. Velikost úhlu α_s je závislá na velikosti S_α . [6] Dle literatury [1] a [55] se tento úhel pohybuje $\approx 37,6^\circ$. U materiálu, který je zatlačován do obrobeného povrchu, se předpokládá plastická napjatost (přetvoření). Pro takto plasticky napjatý materiál byly stanoveny tři hypotézy:

- obrobený povrch zůstává na úrovni **i** \rightarrow nedošlo k uvolnění deformace
- obrobený povrch přejde do úrovně **ii** \rightarrow došlo k částečnému uvolnění deformace
- předpokládá se plné elastické zotavení obrobeného povrchu (hladina **iii**) [55]



Obr. 6 - 16: Zjednodušené schéma řezného břitu v záběru s vyznačením bodu S [55]

Tloušťka odřezávané vrstvy h je:

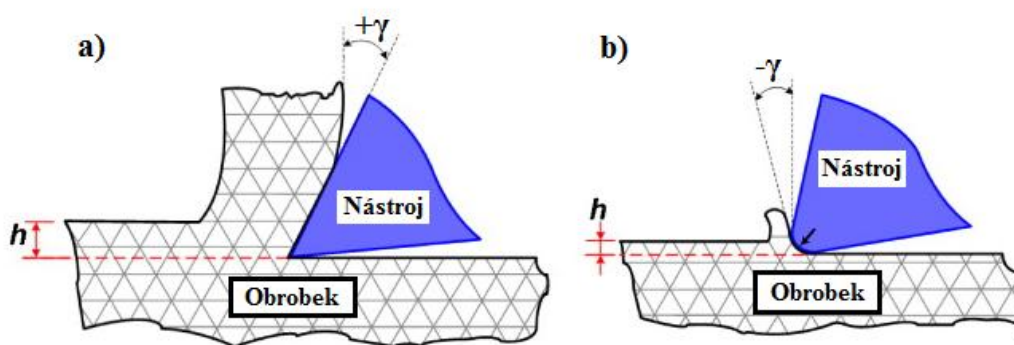
$$h = h_s + t \quad (R. 7)$$

Výpočet úhlu kluzu θ [55]:

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{t}{r_n \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\alpha}{2} \right) + \frac{h_s}{\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} + \alpha \right)} - \sqrt{2 \cdot r_n \cdot h_s - h_s^2} + \frac{t_c}{\cos \alpha} - t \cdot \operatorname{tg} \alpha} \right) \quad (R. 8)$$

kde t_c ... tloušťka třísky

Základním teoretickým předpokladem při klasickém konvenčním obrábění je dokonale ostrý břit a nulový kontakt mezi hřbetem řezného nástroje a obrobenou plochou. Dokonale ostrý břit je použit v mnoha existujících modelech zabývajících se tvorbou třísky při obrábění. K oddělování materiálu ve formě třísek dochází při překročení sřihové meze pevnosti obráběného materiálu, a to v důsledku interakce mezi ostrým nástrojem a obrobkem. Nicméně ostří reálného nástroje má vždy konečnou ostrost. V oblasti mikro-obrábění hraje důležitou roli velikost poloměru zaoblení ostří a tloušťka odřezávané vrstvy. Komerčně dostupné nástroje mají obvykle poloměr zaoblení ostří od 5 do 250 μm . [56] a [57]



Obr. 6 - 17: obrábění v a) makro-měřítku a b) mikro-měřítku [56]

Velmi významným faktorem je poměr velikosti poloměru zaoblení ostří a tloušťky odřezávané vrstvy. Mohou nastat tři případy:

1. $h > r_n$: případ obecného řezání (obrábění)
2. $h = r_n$: do procesu obrábění vstupuje účinek negativního úhlu čela (viz obr. 6-17). V kombinaci s velmi nízkým posuvem na zub může nastat situace, kdy nebude docházet k obrábění.
3. $h < r_n$: obráběný materiál je zatlačován pod řezný břit a zároveň dochází k jeho elastické deformaci. Při dokončovacím soustružení a frézování se na obrobeném povrchu objevují otřepy. V případě vrtání se objevují otřepy na vstupu a výstupu z díry. [4], [5] a [56]

Poměr h/r_n ovlivňuje efektivní úhel čela, tloušťku odřezávané vrstvy a specifický řezný odpor. V okamžiku, kdy se tento poměr stává rovný nebo menší než 1, efektivní úhel čela se stává negativní. Basuray a kol. [58] stanovili, že úhel $\alpha_s = 37,6^\circ$ (proměnná hodnota, která

přibližně odpovídá: $90^\circ - \gamma_{eff}$, kapitola 2 – str. 12). Všechna výše uvedená stanoviska jsou závislá na tření mezi nástrojem a třískou, typu a mikro-struktuře materiálu obrobku, tvrdosti apod.

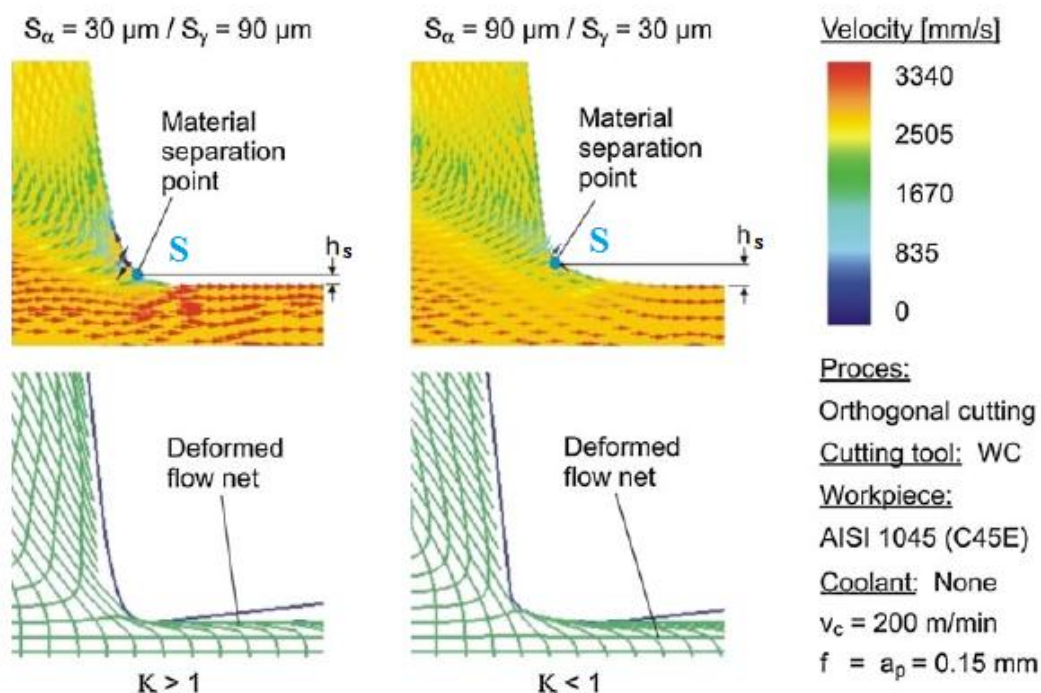
Další výzkum v této oblasti provedli *Aramcharoen a Mativenga* [56], kteří ve své publikaci uvádí, že poměr h/r_n může být:

- při obrábění měkké oceli a hliníku HSS nástroji: $0,11 \div 0,16$
- při obrábění oceli SK a HSS nástroji: $0,2 \div 0,4$
- obecně: $0,293$

Z poměru $h/r_n = 0,293$, při $h = 20 \mu\text{m}$, lze dopočítat, že $r_n = 68 \mu\text{m}$. Teoreticky by tedy bylo možné obrábět břitem jehož r_n je mnohem větší než h . Zcela prakticky je vysoká hodnota r_n zbytečná, neboť dle kapitoly 4 se jeho optimum pohybuje v intervalu 20 až 30 μm . Dále je nezbytné si uvědomit, že při poměru $h/r_n < 1$ je nutné uvažovat se silným vlivem negativního efektivního úhlu čela.

Z výše uvedených důvodů je stanovena maximální hodnota r_n na 20 μm , tj. poměr $(h/r_n = 1)$ ⁷.

Velikost poloměru zaoblení ostří a především hodnota S_α má vliv na deformaci obrobeného povrchu, viz obr. 6-18. Vektory a jejich barva představují směr toku materiálu a jeho rychlost. Z obr. 6-18 je patrné, že hodnota h_s je ovlivněna především hodnotou S_α . Z toho plyne, že pro „ostré“ nástroje a asymetricky upravené řezné břity, kde $K > 1$, bude bod S situován téměř na hřbetě (plocha P_α). [6]



Obr. 6 - 18: Vliv asymetricky upraveného řezného břitu na separační bod S [6]

⁷ V případě konstrukce destičky IN04S je úhel κ_r se blíží 0° , tedy $a_p = h$

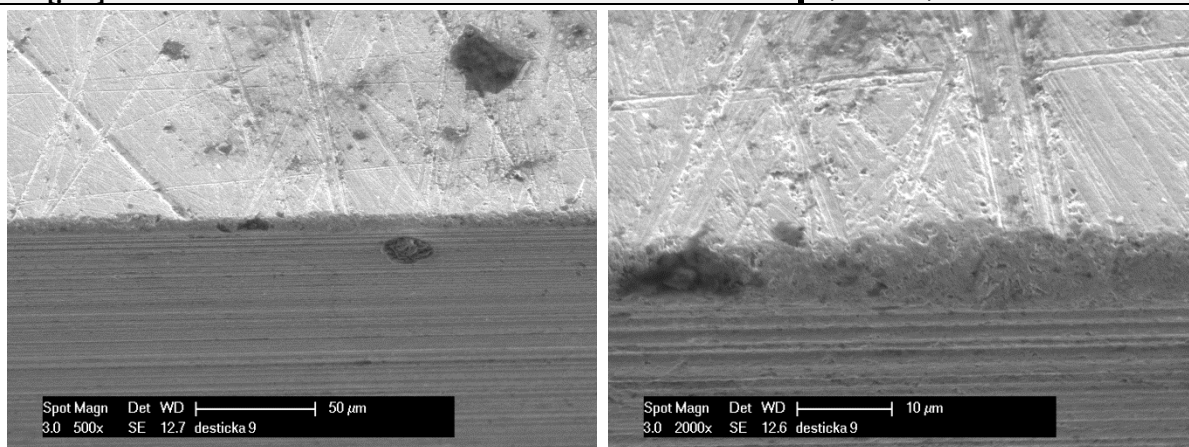
6.2.2 Analýza mikro-geometrie upravených VBD na požadované r_n

Od dodavatele nástrojů bylo objednáno 100 ks VBD, jejichž funkční plochy byly pouze vybroušeny. Následně byla, na vybraném počtu VBD, provedena úprava ostří technologií vlečného omílání. Požadavkem bylo vytvoření definovaného poloměru zaoblení ostří 10, 15 a 20 μm s faktorem symetričnosti ≈ 1 . Omezující hodnotou r_n byla axiální hloubka řezu, tj. $r_{ni} \leq 20 \mu\text{m}$.

V *tab. 6-6, 6-7 a 6-8* jsou uvedeny parametry měřených nástrojů změřených na IFM G4. Stav ostří je zobrazen na *obr. 6-19, 6-20 a 6-21*. Parametry řezného břitu referenčního nástroje jsou uvedeny v *příloze P2.1, tab. P3*.

Tab. 6 - 6: Parametry břitu s $r_n = 10 \mu\text{m}$

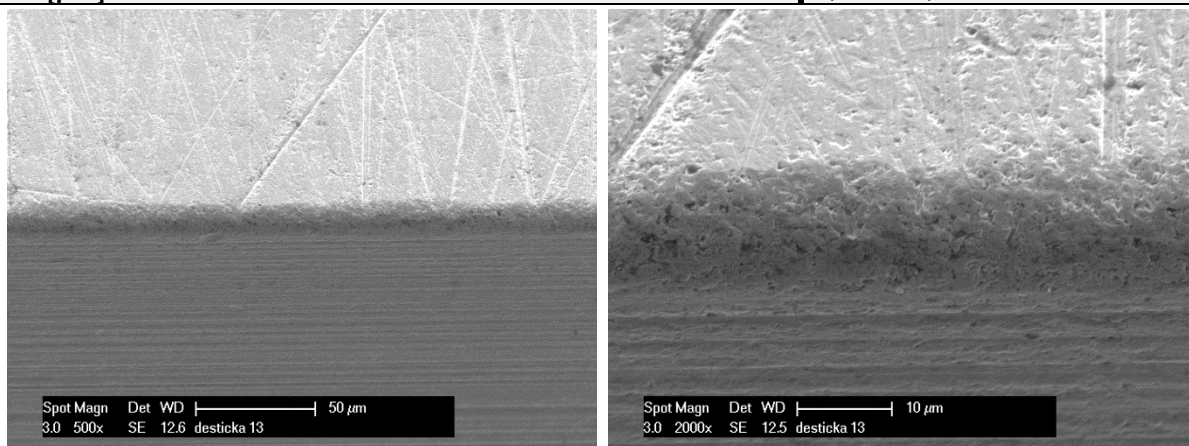
r_n [μm]	8,85 ÷ 10,7
K [-]	0,91 ÷ 1,19
Rsa [μm]	0,528 ÷ 0,692
Rsz [μm]	2,003 ÷ 2,311



Obr. 6 - 19: Ostří nástroje s $r_n = 10 \mu\text{m}$ 500x a 2000x zvětšené – elektronový mikroskop

Tab. 6 - 7: Parametry břitu s $r_n = 15 \mu\text{m}$

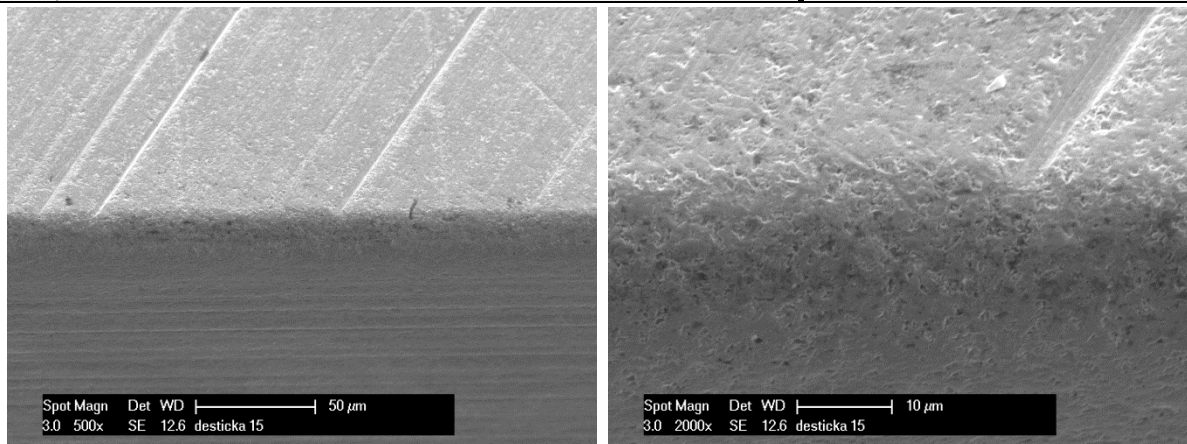
r_n [μm]	13,39 ÷ 15,72
K [-]	0,94 ÷ 1,23
Rsa [μm]	0,414 ÷ 0,603
Rsz [μm]	1,548 ÷ 2,017



Obr. 6 - 20: Ostří nástroje s $r_n = 15 \mu\text{m}$ 500x a 2000x zvětšené – elektronový mikroskop

Tab. 6 - 8: Parametry břítu s $r_n = 20 \mu\text{m}$

r_n [μm]	19,14 ÷ 20,15
K [-]	0,95 ÷ 1,12
Rsa [μm]	0,241 ÷ 0,326
Rsz [μm]	1,009 ÷ 1,368

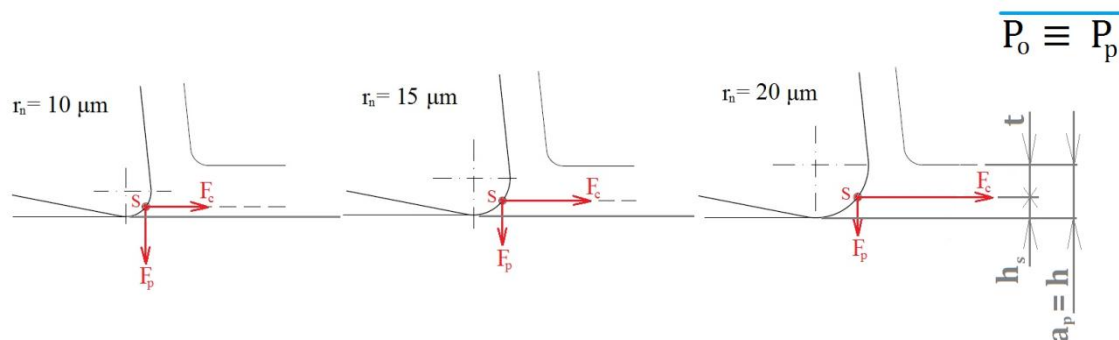


Obr. 6 - 21: Ostří nástroje s $r_n = 20 \mu\text{m}$ 500x a 2000x zvětšené – elektronový mikroskop

Interval jednotlivých kroků upravených poloměrů zaoblení ostří byl volen s ohledem na ostrý („referenční“) nástroj. Jeho hodnota r_n se pohybuje v rozsahu $4,8 \div 6,2 \mu\text{m}$ (viz příloha P2.1, tab. P2-3). Proto jako první hodnota r_n byla zvolena $10 \mu\text{m}$ a další vždy o $5 \mu\text{m}$ vyšší. Přestože je technologie vlečného omílání již velmi dobře zmapována a samotná firma, jež upravovala VBD IN04S, má v oblasti omílání mnohaletou zkušenost, nebylo z technologického hlediska možné vyrobit nástroje na požadované absolutní hodnoty r_n . Opět jsou tedy přiloženy tabulky (tab. 6-6, 6-7 a 6-8), které udávají rozsah naměřených hodnot r_n , K a hodnotu drsnosti ostří Rsa a Rsz . Z přiložených fotografií (obr. 6-19, 6-20 a 6-21) je patrné, že na ostří nejsou viditelné známky mikro-defektů a čím vyšší hodnota r_n , tím je ostří kompaktnější. Přímým odrazem kvality ostří jsou již zmiňované hodnoty Rsa a Rsz , přičemž platí, že čím větší r_n , tím je menší Rsa a Rsz .

6.2.3 Analýza naměřených hodnot - řezné síly v závislosti na r_n

Před analýzou silového zatížení nástroje je potřeba definovat teoretickou tloušťku odřezávané vrstvy s ohledem na polohu stagnačního bodu. Výpočet je založen na závěrech autorů *Basuray a kol.* [58], kteří nejprve výpočetně a následně prakticky ověřili hodnotu $\alpha_s = 37,6^\circ$. Schéma záběrových podmínek pro jednotlivé r_n je na *obr. 6-22*. V *tab. 6-9* lze nalézt hodnotu nedeformované teoretické tloušťky odřezávané vrstvy, teoretický průřez odřezávané vrstvy, předpokládaný objem odebraného materiálu a předpokládanou hmotnost třísky.



Obr. 6 - 22: Velikost r_n vs. skutečná tloušťka odřezávané vrstvy

Tab. 6 - 9: Parametry teoretické tloušťky odřezávané vrstvy

$a_p = 20\mu\text{m}$				
r_n [μm]	t_t [μm]	$A_t = t_t \times f_z$ [mm^2]	Odebraný materiál [%]	teoretická m_{ct} [g]
0	20	0,09	100	0,0349
ref.	18,1	0,08145	90,5	0,0316
10	16,1	0,07245	80,5	0,028
15	14,15	0,063675	71	0,025
20	12,2	0,0549	61	0,021

Na základě znalostí záběrových podmínek je možné vyjádřit vliv velikosti poloměru zaoblení ostří na jednotlivé složky řezných sil. Naměřená data byla opět M-S analyzována a matematicky popsána pomocí následujících vzorců⁸:

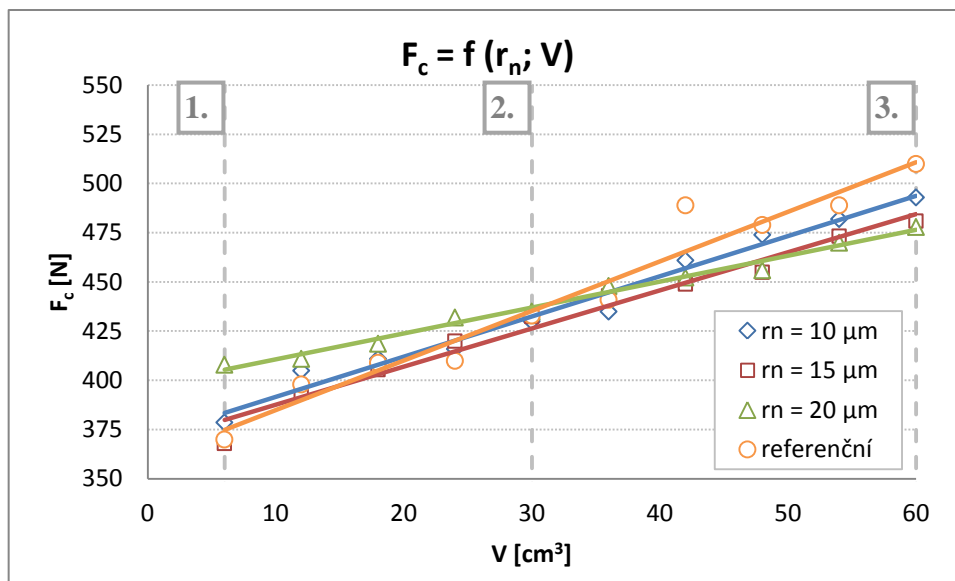
$$F_p = 410 \times r_n^{-0,126} \times V^{0,095} \quad (R. 9)$$

$$F_c = 292 \times r_n^{0,029} \times V^{0,097} \quad (R. 10)$$

$$F = 435 \times r_n^{-0,011} \times V^{0,08} \quad (R. 11)$$

Navržený model pro F_f , na testované pravděpodobnostní hladině 95%, byl statisticky nevýznamný, proto není uváděn, viz výsledky statistického testu jednotlivých vzorců *příloha P8*.

⁸ Do matematických vzorců nejsou zahrnuty výsledky získané při testování referenčního nástroje!!!

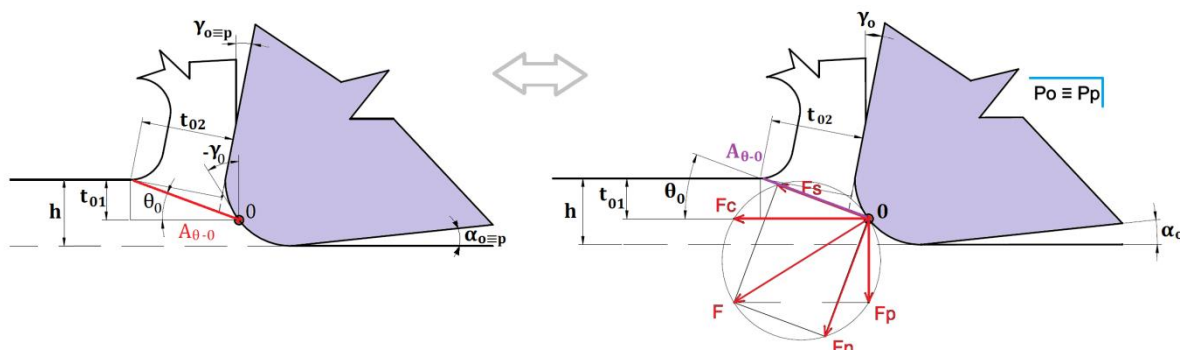


Obr. 6 - 23: Vliv r_n a V na F_c

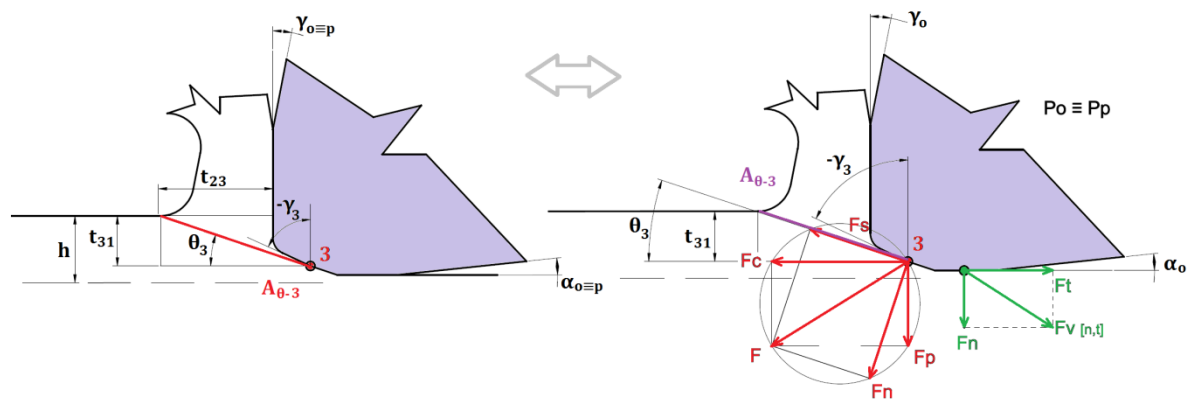
Závislost řezné síly, pro jednotlivé poloměry zaoblění ostří, na objemu odebraného materiálu je zobrazena v grafu na obr. 6-23. Opět je patrné, že se zvyšujícím se objemem odebraného materiálu dochází k nárůstu F_c , tj. **směrnice proložených přímk, pro jednotlivé r_n , jsou tím vyšší, čím je vyšší opotřebení řezného břitu**. Pokud tučně zvýrazněnou větu budeme konfrontovat s grafy opotřebení (Obr. 6 - 28, str. 67), tak vyvstávají následující otázky:

- Jaký byl skutečný tvar břitu v okamžiku, kdy na řezném břitu bylo naměřeno opotřebení vyšší než tloušťka odřezávané vrstvy, resp. hloubka řezu?
- Jaká byla skutečná poloha stagnačního bodu - skutečná tloušťka odřezávané vrstvy?
- Je velikost F_c ovlivněna ještě nějakým jiným faktorem?

Pro objasnění položených otázek je nutné zaměřit se na mechanismus vzniku třísky (viz obr. 6-24) nejprve na novém (neopotřebeném) břitu a následně na opotřebeném břitu (viz obr. 6-25). Do grafu na obr. 6-23 jsou vloženy 3 svislé přerušované čáry, pomocí nichž bude svázána velikost F_c se stavem řezného břitu.



Obr. 6 - 24: Mechanismus vzniku třísky - neopotřebený břit



Obr. 6 - 25: Mechanismus tvorby třísky - opotřeбенý břit (vznik plošky na ostří s negativním efektivním úhlem čela - γ_i)

Při vzniku třísky platí následující vzorce:

$$k_c = \frac{F_c}{A} = \frac{F_c}{h \times b} \quad (R. 12)$$

$$\tau_s = \frac{F_s}{A_{\theta-0}} = \frac{F_s \times \sin\theta}{t_{01} \times f_z} \quad (R. 13)$$

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2} = \sqrt{F_s^2 + F_n^2} \quad (R. 14)$$

$$F_n = F_c \times \sin\theta + F_p \times \cos\theta \quad (R. 15)$$

$$F_s = F_c \times \cos\theta - F_p \times \sin\theta \quad (R. 16)$$

Ze schematických nákrešů mechanismu tvorby třísky a vzorců pro výpočet jednotlivých složek řezných sil lze stanovit následující:

- čím menší poloměr zaoblení ostří, tím větší skutečná tloušťka odřezávané vrstvy při konstantním h ($h = \text{konst.} \rightarrow \downarrow r_n \rightarrow \uparrow t$)
- čím větší skutečná tloušťka odřezávané vrstvy, tím vyšší řezná síla ($\uparrow t \rightarrow \uparrow F_c$)
- čím menší skutečná tloušťka odřezávané vrstvy, tím více se projevuje vliv negativního efektivního úhlu čela plošky na ostří ($\downarrow t \rightarrow \downarrow \gamma_i$)
- čím negativnější efektivní úhel čela plošky na ostří, tím menší úhel roviny kluzu ($\downarrow \gamma_i \rightarrow \downarrow \theta$)
- čím menší úhel roviny kluzu, při zachování velikosti tloušťky odřezávané vrstvy, tím větší plocha roviny kluzu a tím větší řezná síla a pasivní síla ($t_{01} = t_{03}$: $\downarrow \theta \rightarrow \uparrow A_{\theta-3} \rightarrow F_c$ a F_p)
- čím menší tloušťka odřezávané vrstvy, tím negativnější efektivní úhel čela plošky na ostří, menší úhel roviny kluzu, větší plocha roviny kluzu a ve výsledku větší řezná síla a pasivní síla ($\downarrow t \rightarrow \downarrow \gamma_i \rightarrow \downarrow \theta \rightarrow \uparrow A_{\theta} \rightarrow \uparrow F_c$ a F_p)

Ve výčtu stanovisek lze nalézt rozpor mezi druhým a posledním bodem:

$$(\uparrow t = \uparrow F_c) \times (\downarrow t \rightarrow \downarrow \gamma_i \rightarrow \downarrow \theta \rightarrow \uparrow A_{\theta} \rightarrow \uparrow F_c \text{ a } F_p)$$

Je však nutné si uvědomit, že velikost úhlu roviny kluzu, plocha roviny kluzu a negativní úhel čela ve výsledku ovlivní velikost F_c a F_p .

Potvrzení pravdivosti stanovisek bude provedeno na konkrétním příkladu z grafu na obr. 6-23 (str.63). Vyšetřovány budou dva extrémy, tedy referenční nástroj a nástroj s $r_n = 20 \mu\text{m}$ v místě 1. a 3. Místo 1. lze považovat stav, kdy došlo k zaříznutí břitu. Břity jsou rovnoměrně abrazivně opotřebený pro nástroj s $r_n = 20 \mu\text{m}$ a nerovnoměrně abrazivně opotřebený u referenčního nástroje. Dosažením kritéria $V = 60 \text{ cm}^3$ je místo 3. Ostří referenčního nástroje je vydrolené, zároveň mezi čelem a hřbetem břitu vznikl „žlábek“. Ostří nástroje s $r_n = 20 \mu\text{m}$ je rovnoměrně abrazivně opotřebeno (viz Obr. 6 - 29, str. 68). Z tab. 6-10 lze odečíst následující:

▪ **v místě 1.:**

- předpoklad: $t_{x1}(\text{ref.}) > t_{x1}(r_n = 20 \mu\text{m}) \rightarrow F_c(\text{ref.}) > F_c(r_n = 20 \mu\text{m})$
- realita: opotřebením břitu ovlivnilo polohu $S \rightarrow$ tím $t_{x1} \rightarrow$ tím F_c
 - a) referenční nástroj $\rightarrow \uparrow VB_{max}$ a $\uparrow KB$ (oproti $r_n = 20 \mu\text{m}$) $\rightarrow \downarrow t_{x1} \rightarrow \downarrow F_c$
(výrazným opotřebením čela a hřbetu břitu vznikl „nový“ řezný břit – vliv plošky na ostří s negativním efektivním úhlem čela minimální)
 - b) $r_n = 20 \mu\text{m} \rightarrow \downarrow VB_{max}$ a $\downarrow KB$ (oproti ref.) $\rightarrow \downarrow S \rightarrow \uparrow t_{x1} \rightarrow \uparrow F_c$

▪ **v místě 3.:**

- předpoklad: $t_{x1}(\text{ref.}) < t_{x1}(r_n = 20 \mu\text{m}) \rightarrow F_c(\text{ref.}) \leq F_c(r_n = 20 \mu\text{m})$
- realita: přechod mezi hřbetem a čelem břitu ve formě „žlábků“ u ref. nástroje ovlivnil velikost t_{x1} , γ_i , θ , $A_\theta \rightarrow$ tím F_c
 - a) referenční nástroj $\rightarrow \uparrow VB_{max}$ a $\uparrow KB$ (oproti místu 1.) $\rightarrow \downarrow t_{x1} \rightarrow \downarrow \gamma_i \rightarrow \uparrow F_c$.
Vliv velikosti k_c na F_c při velmi malé h lze vyloučit, neboť hmotnost třísky výrazně neklesla oproti vyšetřovanému místu 1., viz Tab. 6 - 10). Proto nárůst F_c je možné přisuzovat plošce na ostří s negativním efektivním úhlem čela.
 - b) $r_n = 20 \mu\text{m} \rightarrow \uparrow VB_{max}$ a $\uparrow KB$ (oproti místu 1.) $\rightarrow \uparrow S \rightarrow \downarrow t_{x1} \rightarrow \downarrow \gamma_i \rightarrow \uparrow F_c$.

Tab. 6 - 10: Porovnání F_c na základě skutečné tloušťky odřezávané vrstvy:

		Vyšetřované místo	t_t [μm]	t_{x1} [μm] (skutečná) ⁹	F_c [N]
Nástroj	referenční	1.	18,1	12,7	370
		3.	18,1	12,4	510
	$r_n = 20 \mu\text{m}$	1.	12,2	17,4	408
		3.	12,2	14,7	478

⁹ Skutečná tloušťka odřezávané vrstvy (t_{x1}) je dopočítána z hmotnosti třísek; teoretická tloušťka odřezávané vrstvy (t_t) je vypočítána na základě literární rešerše a hodnoty $\alpha_s = 37,6^\circ$

t_{x1} = skutečná tloušťka odřezávané vrstvy pro nástroj s konkrétní hodnotou r_n

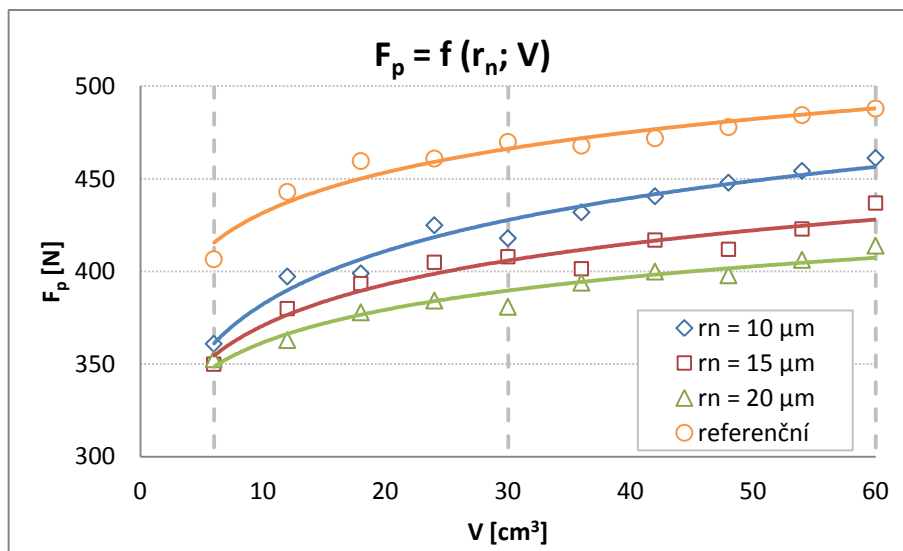
γ_i = negativní efektivní úhel čela plošky na ostří

θ = úhel kluzu

A_θ = plocha roviny kluzu

Pasivní složka řezné síly je taktéž narůstající se zvyšujícím se objemem odebraného materiálu (viz *obr. 6-26*). Nárůst je zapříčiněn následujícími vlivy:

- velikost a tvar opotřebení řezného břítu,
- třením mezi obrobeným povrchem a vzniklou „ploškou“ na hřbetu břítu (naznačeno v *obr. 6-25 vpravo, str. 64*),
- velikostí úhlu roviny kluzu a s tím související plochy,
- negativním efektivním úhlem čela plošky na ostří ($-\gamma_i$)



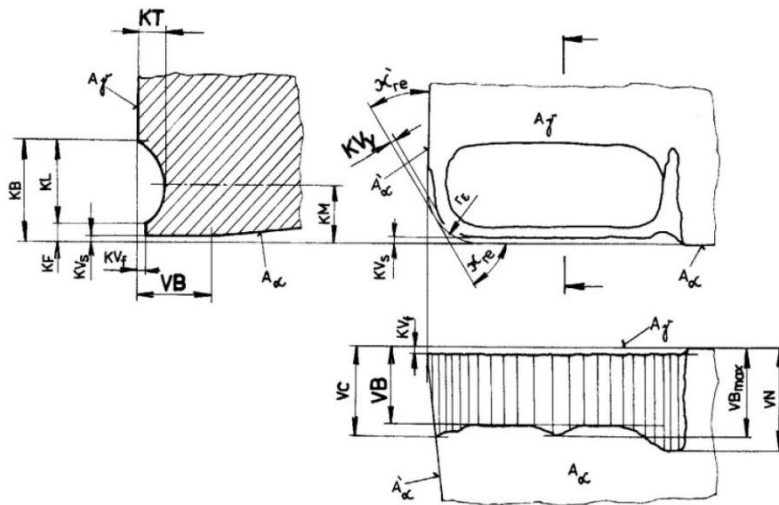
Obr. 6 - 26: Vliv r_n a V na F_p

6.2.4 Analýza naměřených hodnot - opotřebení řezného nástroje v závislosti na r_n

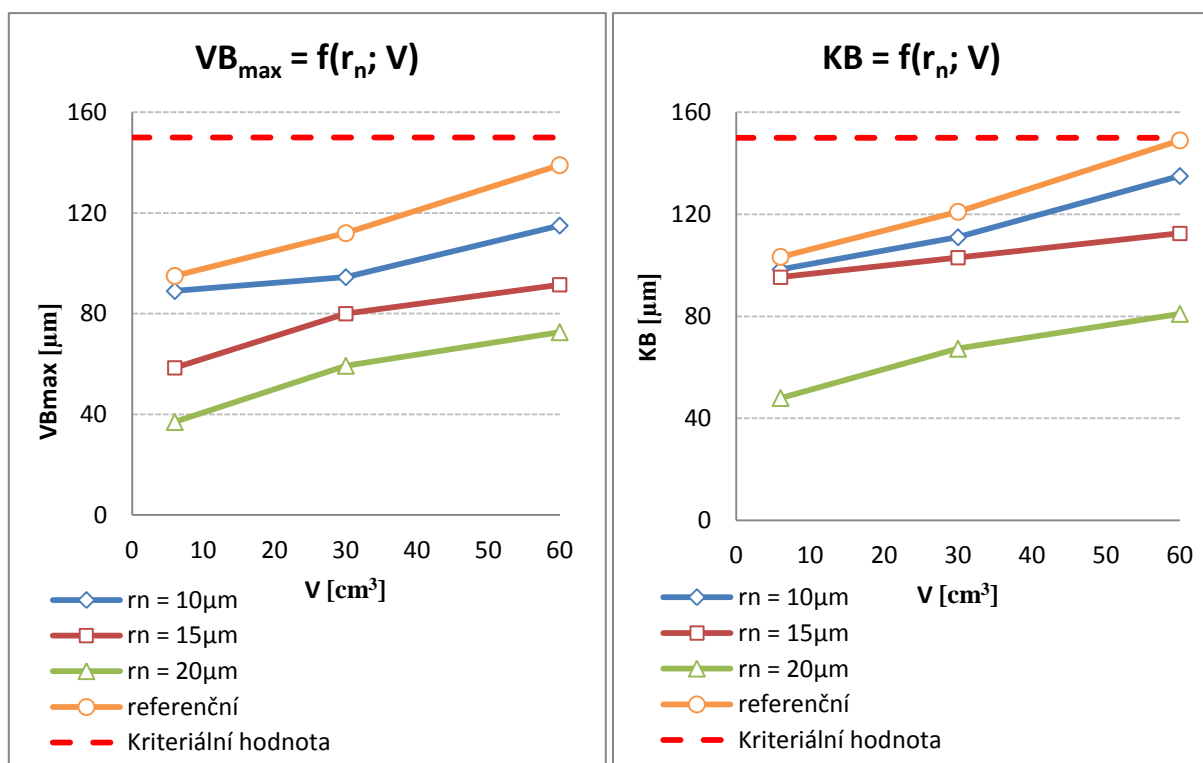
Opotřebení řezného břítu je v grafu na *obr. 6-28* vyjádřeno pomocí průměrné hodnoty z opakovaných měření. Co se týče opotřebení na hřbetě, nejnižšího variačního rozpětí naměřených hodnot bylo dosaženo při poloměru zaoblení ostří $20 \mu\text{m}$. Rozptyl hodnot se pohybuje do $5 \mu\text{m}$ od průměrné hodnoty. Se snižujícím se r_n dochází k nárůstu variačního rozpětí naměřených hodnot a při $r_n = 10 \mu\text{m}$ je nejvyšší. Stejným způsobem je možné popsat opotřebení na čele. Vyšší variační rozpětí pro menší r_n znamená nižší opakovatelnost a spolehlivost naměřených výsledků. Pro $r_n = 20 \mu\text{m}$ bylo dosaženo nejvyšší spolehlivosti naměřených dat a opakovatelnosti výsledku. Měřené parametry na řezném břítu odpovídají běžným zvyklostem a vychází z normy ČSN ISO 3685, viz *obr. 6-27*.

Způsob opotřebení jednotlivých nástrojů je závislý na velikosti poloměru zaoblení ostří. Jak je patrné z *obr. 6-29*, tak při nejnižším r_n převládá vydrolování částí řezného břítu. Se zvyšujícím se poloměrem zaoblení ostří dochází ke snížení měrného tlaku na ostří, tudíž k zvýšení jeho pevnosti, tj. k přechodu od vydrolování k rovnoměrnému abrazivnímu opotřebení a to jak na hřbetě, tak na čele řezného břítu. S ohledem na průběh opotřebení a výsledky drsnosti obrobeného povrchu je možné konstatovat, že nástroj s poloměrem zaoblení ostří $20 \mu\text{m}$ by dosáhl, v porovnání s ostatními testovanými nástroji, vyšší trvanlivosti. Jelikož první experimenty (viz *kapitola 6.1*) byly vedeny tak, aby bylo dosaženo

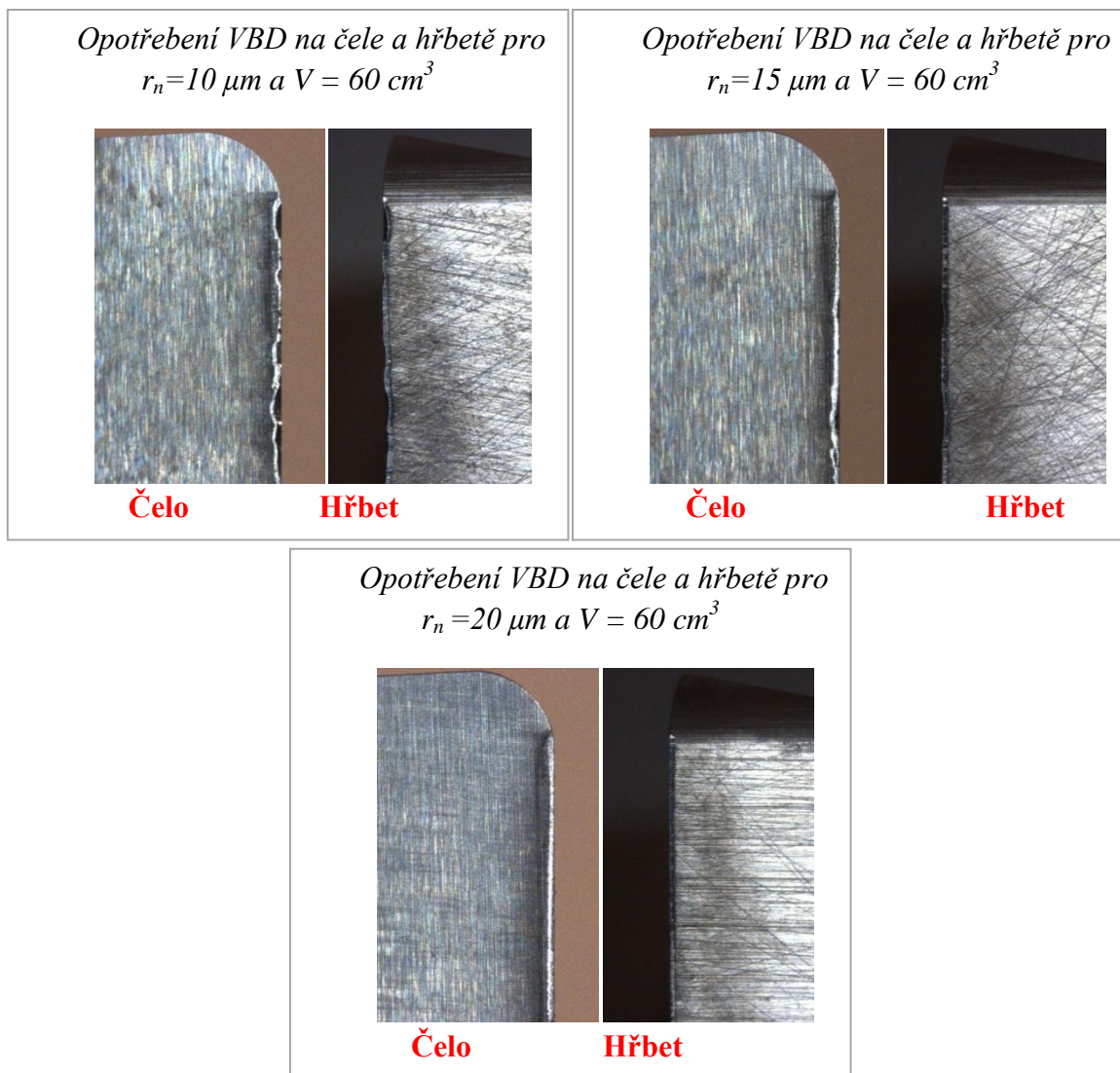
maximální produktivity obrábění, za současného splnění kritériálních podmínek, tak z výsledků je možné predikovat, že řezné podmínky pro nástroj $r_n = 20 \mu\text{m}$ jsou poddimenzovány. VBD s touto úpravou by mohla obrábět za vyšších řezných podmínek.



Obr. 6 - 27: Kritéria opotřebení řezného břitu [61]



Obr. 6 - 28: Vliv velikosti r_n ostří na opotřebení řezného břitu při konstantních řezných podmínkách



Obr. 6 - 29: Opotřebení vyměnitelných břitových destiček při proměnném r_n

6.2.5 Analýza naměřených hodnot - drsnost obrobeného povrchu v závislosti na r_n

Nedílnou součástí experimentálního obrábění bylo měření drsnosti obrobeného povrchu. Na základě výsledků a následných doporučení, z kapitoly 6.1.4 (str. 52), byla naměřená data M-S analyzována a její výsledky jsou uvedeny v příloze P9. Analýza prokázala, že naměřené hodnoty Ra a Rz nejsou závislé na místě naměru a lze je považovat za jeden soubor dat. Jako míra centrální tendence byl opět použit medián. K vykreslení průběhu drsností byl použit bodový graf (viz obr. 6-30), ze kterého lze vyčíst následující:

- Průběhy drsností Ra a Rz jsou podobné.
- Při $V = 6 \text{ cm}^3$ je pro všechny testované úpravy a referenční nástroj dosaženo nejvyšší drsnosti obrobeného povrchu. V této fázi docházelo k „zařezávání“ břitu, proto je možné vyšší hodnoty Ra a Rz spojit s vytvářením „nové“ mikro-geometrie břitu.

- Naměřené body, pro $r_n = 20 \mu\text{m}$, je možné proložit přímkou, která bude rovnoběžná s osou x , tzn., že stav obrobeneho povrchu zůstal stejný po celou dobu obrábění → bylo dosaženo opakovatelnosti naměřených hodnot a tím vyšší spolehlivosti řezného procesu.
- Při $V = 30$ a 60 cm^3 → nemá objem odebraného materiálu a poloměr zaoblení ostří vliv na Ra i Rz . Nárůst opotřebení na hřbetě břitu neměl vliv na drsnost obrobeneho povrchu. Z tohoto zjištění se dá usuzovat na vznik „plošky“ na hřbetu břitu s hladícím efektem.

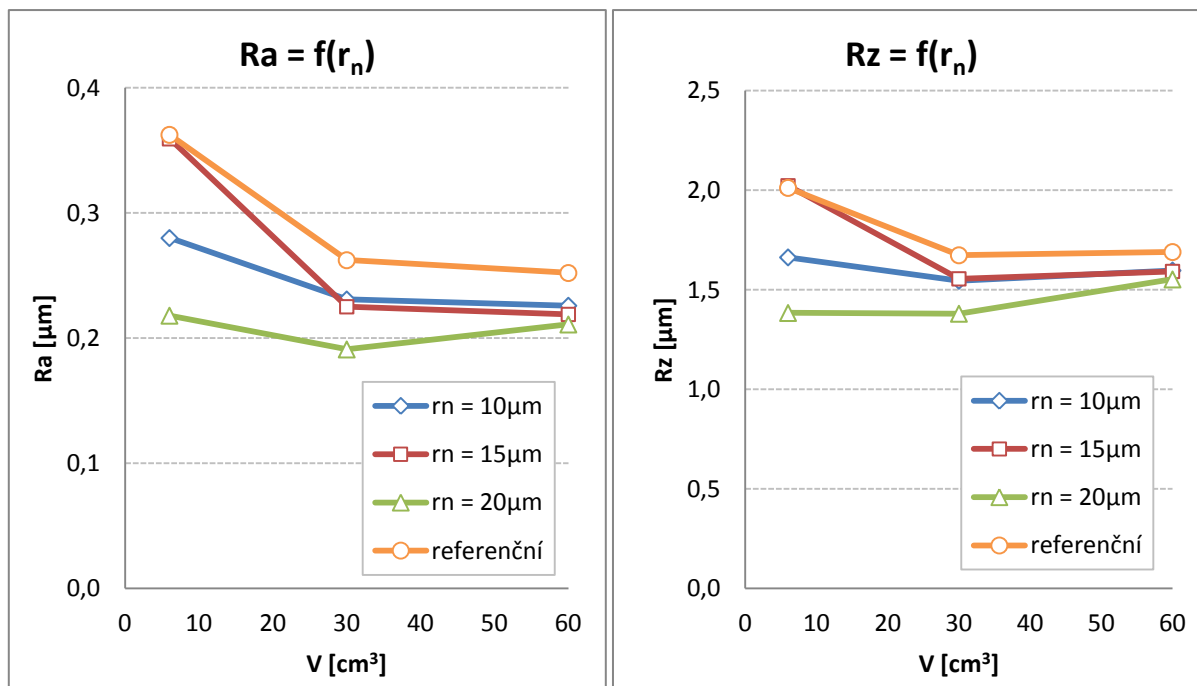
Poslední bod, z výčtu hodnocení grafu na *obr. 6-30*, nabízí otázku:

Jaký vliv mělo opotřebení břitu na kvalitu povrchu?

Otázku je možné zodpovědět pomocí rozboru profilu povrchu a křivky materiálového podílu. Jejich obrázky jsou vloženy do přílohy *P10*. Křivky profilu povrchu byly získány nastavením největší měřené délky, tj. $l_t = 17,5 \text{ mm}$ na drsnoměru *MarSurf M300*.

Z křivky profilu povrchu při $V = 6 \text{ cm}^3$ je možné vypočítat vyvážený podíl hrotů a rýh (též nazýváno jako vrcholů a údolí). Se zvyšujícím se objemem odebraného materiálu se podíl mění ve prospěch rýh. **Čím vyšší je opotřebení řezného břitu, tím vyšší je obsah plochy rýh na vyhodnocované délce.** Při podrobném rozboru záznamu profilu povrchu se dá vypočítat pravidelně se opakující tvar rýhy po $4,5 \text{ mm}$, což odpovídá velikosti posuvu. Pro nástroj s $r_n = 10 \mu\text{m}$ a referenční, při $V = 60 \text{ cm}^3$, jsou rýhy nejvíce zřetelné.

Nástroj s $r_n = 20 \mu\text{m}$ měl po celou dobu obrábění vyváženou plochu vrcholů a rýh → jednotný povrch.



Obr. 6 - 30: Vliv poloměru zaoblení ostří na drsnost obrobeneho povrchu

6.2.6 Analýza tvaru třísky v závislosti na r_n

Stav ostří během obrábění opět ovlivnil tvar vznikající třísky (obr. 6-31). Vydrolení částí ostří je možné identifikovat na třískách, jež jsou určitým způsobem perforované nebo potřhané. Rovnoměrné opotřebení nástroje dává neporušené, kompaktní třísky. Z rozměru odebraného průřezu třísky (viz Obr. 6 - 3, str. 45) je možné spočítat:

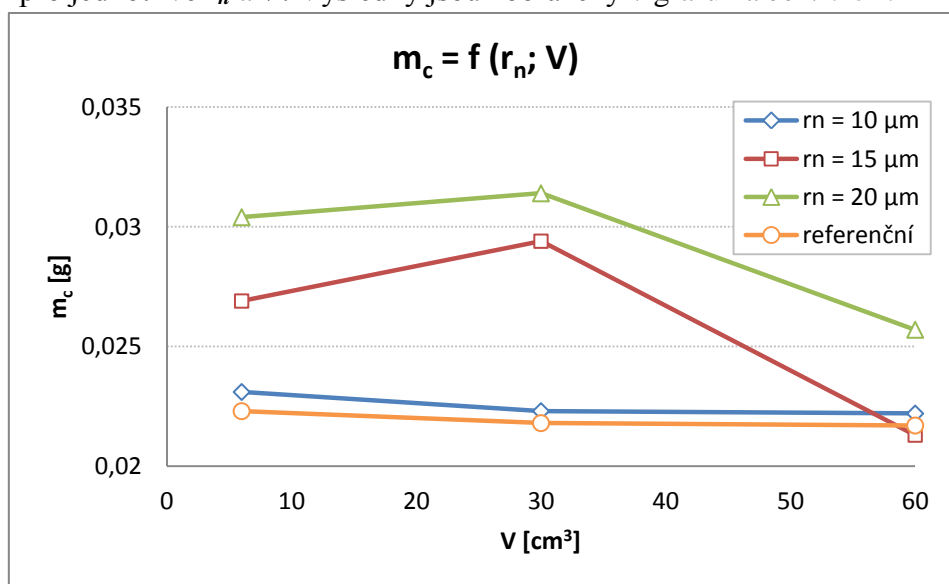
- teoretický objem odebraného materiálu: $V_t = 4,4981 \text{ mm}^3$.
- teoretickou hmotnost třísky¹⁰: $m_{ct} = 0,0349 \text{ g}$.

Uvažujeme-li polohu stagnačního bodu pro jednotlivé r_n dle Tab. 6 - 9, str. 62, tak hmotnost třísky by se měla pohybovat v intervalu od 0,0279 g až po 0,0213 g za předpokladu, že dojde k odříznutí materiálu při jednom přejezdu břitu.



Obr. 6 - 31: Tvar vznikajících třísek po $V = 60 \text{ cm}^3$ pro: a) $r_n = 10 \text{ }\mu\text{m}$; b) $r_n = 15 \text{ }\mu\text{m}$; c) $r_n = 20 \text{ }\mu\text{m}$

K vážení třísek byly použity laboratorní váhy Radwag AS 220/C/2 (specifikace příloha P6.1) s možností odečítání na 0,1 mg a přesností měření na 1 mg. Váženy byly vždy 3 ks třísek pro jednotlivé r_n a V . Výsledky jsou zobrazeny v grafu na obr. 6-32.



Obr. 6 - 32: Vliv V a r_n na m_c

¹⁰ Hustota P91: $\rho = 7,76 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$

Z hodnot v grafu na *obr. 6-32* vyplývá následující:

- Hmotnosti třísek pro $r_n = 10 \mu\text{m}$ a referenčního nástroje jsou srovnatelné po celou dobu obrábění \rightarrow poloha S na ostří byla podobná.
- Při $V = 60 \text{ cm}^3$ \rightarrow poloha bodu S podobná pro $r_n = 10 \mu\text{m}$, $r_n = 15 \mu\text{m}$ a referenční nástroj.
- Pro $r_n = 10 \mu\text{m}$ a referenční nástroj je hmotnost třísek nejnižší, přičemž s ohledem na polohu bodu S a z toho vyplývající nedeformovanou tloušťku odřezávané vrstvy (t), by měla být nejvyšší \rightarrow opotřebením nástroje změnilo skutečný tvar řezného břitu.
- Nejvyšší hmotnosti třísky, při $V = 60 \text{ cm}^3$, je dosaženo nástrojem s $r_n = 20 \mu\text{m}$ \rightarrow nejvyšší skutečná tloušťka odřezávané vrstvy.

Výsledky hmotnostního měření třísek posloužily především ke stanovení skutečné tloušťky odřezávané vrstvy, která byla následně konfrontována se silovým zatížením řezného břitu (*kapitola 6.2.3*).

6.2.7 Shrnutí dosažených výsledků v závislosti na r_n

Cílem *kapitoly 6.2* bylo určení vlivu velikosti r_n na vybrané parametry řezného procesu. Detailní analýza naměřených dat rozkryla potenciál úpravy poloměru zaoblení ostří v oblasti zvyšování řezivosti. Dosažené výsledky jsou shrnuty v následujících bodech:

- F_c a F_p jsou narůstající se zvyšujícím se objemem odebraného materiálu. Pro F_c jsou směrnice proložených přímek pro jednotlivé r_n tím vyšší, čím je vyšší opotřebením řezného břitu. Opotřebením mění skutečný tvar ostří a tím:
 - skutečnou tloušťku odřezávané vrstvy
 - skutečný úhel čela břitu
 - úhel roviny kluzu

V důsledku toho dochází k nárůstu F_c a F_p . Velikost F_p je navíc ovlivněna velikostí tření hřbetu o obrobenou plochu. Nárůst síly F_c a F_p pro $r_n = 20 \mu\text{m}$ není tak výrazný v porovnání s ostatními upravenými břitými.

- Zvyšující se hodnota r_n měla pozitivní vliv na velikost opotřebením břitu a způsob jeho opotřebením. Při nižším r_n převládá vydrolování částí řezného břitu. S narůstajícím r_n ($\uparrow r_n = \uparrow$ pevnost břitu) dochází k postupnému přechodu na abrazivní opotřebením.
- Analýza kvality obrobeného povrchu prokázala, že vyšší r_n zajišťuje menší rozdíly Ra a Rz na začátku a na konci obrábění. Podrobný rozbor profilu povrchu poskytl jiný pohled na topografii obrobené plochy. Břity, které lze považovat za „zaříznuté“, tj. při $V = 6 \text{ cm}^3$, vykazují vyvážený podíl vrcholů a rýh. Opotřebením břity s menším r_n při $V = 60 \text{ cm}^3$ mění tento poměr ve prospěch rýh \rightarrow čím $\downarrow r_n$, tím \uparrow obsah plochy rýh.

Přestože je Ra měřena dle normy a je přibližně $0,4 \mu\text{m}$, tak je nutné sledovat křivku profilu povrchu ve vazbě na jeho funkčnost. Pokud by na obrobenou plochu byly vyžadovány určité parametry, jako je například parotěsnost, pak lze

k obrábění doporučit nástroj s $r_n = 20 \mu\text{m}$. Rovnoměrně rozložené vrcholy a rýhy do sebe vzájemně „zapadnou“, kdežto povrch pouze s rýhami vytvoří prostor pro potenciálně možný únik páry. S $r_n = 20 \mu\text{m}$ je tedy zajištěno (v rozsahu $V = 6 \div 60\text{cm}^3$):

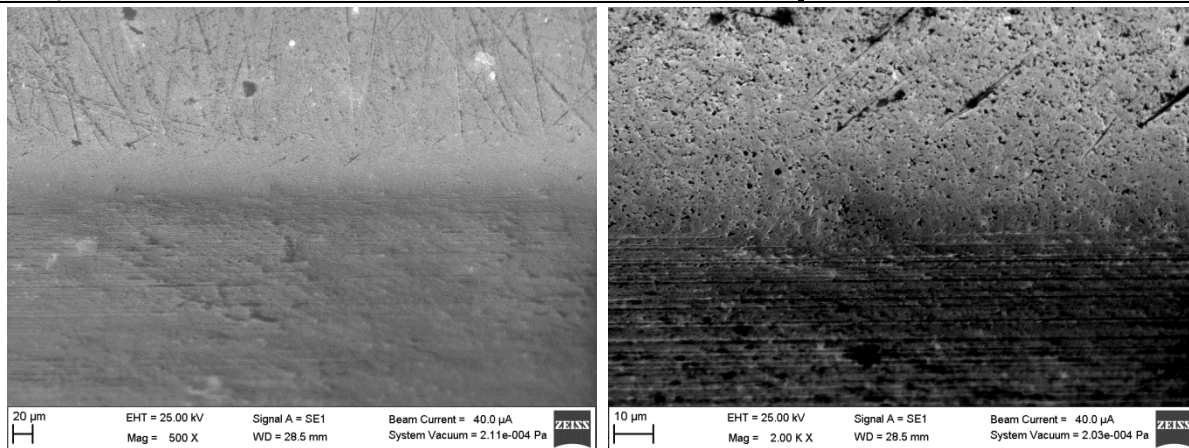
- rovnoměrné rozložení vrcholů a rýh,
 - stejné **R_a** a **R_z** na začátku a konci obrábění,
 - **spolehlivost.**
- Tvar a hmotnost vznikající třísky byly klíčovými prvky pro určení skutečné tloušťky odřezávané vrstvy a stavu řezného břitu. Defekt na ostří v podobě jeho vydrolení způsobuje potřhané nebo perforované třísky a zároveň mění polohu bodu **S** na ostří.

6.3 TESTY ŘEZIVOSTI UPRAVENÉ VBD S PROMĚNNÝM FAKTOREM SYMETRIČNOSTI K

Posledním testovaným parametrem je změna faktoru symetričnosti ostří. Parametr K udává, zda směr spádu profilu je více k čelu ($K > 1$) nebo k hřbetu ($K < 1$) břitu. Kompletní tvar profilu ostří je nezbytné popsat hodnotami S_α , S_γ a Δr , neboť jím již nelze proložit kružnici, ale elipsu. V tab. 6-11 ÷ 6-14 jsou uvedeny parametry ostří jednotlivých břitů a zároveň jsou přiloženy fotografie (obr. 6-33 ÷ 6-36) zobrazující kvalitu ostří. Ostří všech nástrojů bylo upravováno technologií vlečného omílání.

Tab. 6 - 11: Parametry ostří pro $K = 0,4$

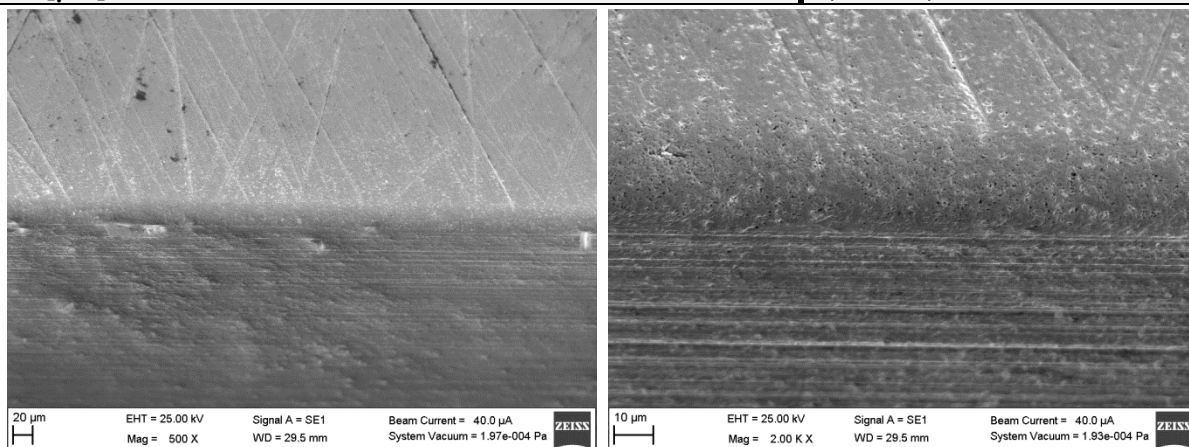
$K [-]$	0,39 ÷ 0,45
$S_\alpha [\mu\text{m}]$	≈ 75
$S_\gamma [\mu\text{m}]$	≈ 30
$\Delta r [\mu\text{m}]$	≈ 23
$Rsa [\mu\text{m}]$	0,191 ÷ 0,215
$Rsz [\mu\text{m}]$	0,765 ÷ 0,809



Obr. 6 - 33: Ostří upravené vlečným omíláním na $K = 0,4$; 500x a 2000x zvětšené

Tab. 6 - 12: Parametry ostří pro $K = 0,6$

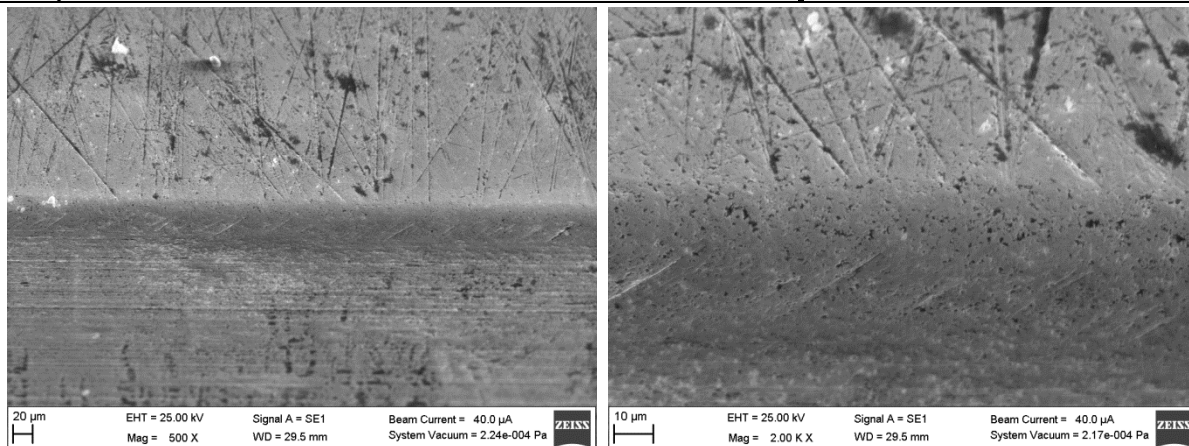
$K [-]$	0,58 ÷ 0,71
$S_\alpha [\mu\text{m}]$	≈ 25
$S_\gamma [\mu\text{m}]$	≈ 15
$\Delta r [\mu\text{m}]$	≈ 9,4
$Rsa [\mu\text{m}]$	0,160 ÷ 0,206
$Rsz [\mu\text{m}]$	0,592 ÷ 0,807



Obr. 6 - 34: Ostří upravené vlečným omíláním na $K = 0,6$; 500x a 2000x zvětšené

Tab. 6 - 13: Parametry ostří pro $K = 1,6$

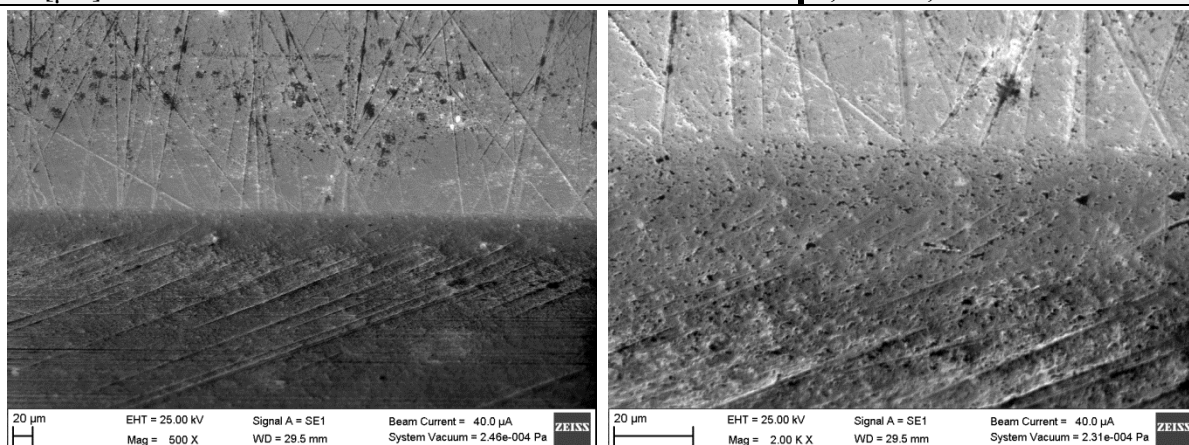
$K [-]$	1,47 ÷ 1,74
$S_\alpha [\mu\text{m}]$	≈ 18
$S_\gamma [\mu\text{m}]$	≈ 30
$\Delta r [\mu\text{m}]$	≈ 12
$Rsa [\mu\text{m}]$	0,225 ÷ 0,385
$Rsz [\mu\text{m}]$	0,813 ÷ 1,324



Obr. 6 - 35: Ostří upravené vlečným omíláním na $K = 1,6$; 500x a 2000x zvětšené

Tab. 6 - 14: Parametry ostří pro $K = 2$

$K [-]$	1,85 ÷ 2,1
$S_\alpha [\mu\text{m}]$	≈ 20
$S_\gamma [\mu\text{m}]$	≈ 40
$\Delta r [\mu\text{m}]$	≈ 14
$Rsa [\mu\text{m}]$	0,202 ÷ 0,413
$Rsz [\mu\text{m}]$	0,704 ÷ 1,601



Obr. 6 - 36: Ostří upravené vlečným omíláním na $K = 2$; 500x a 2000x zvětšené

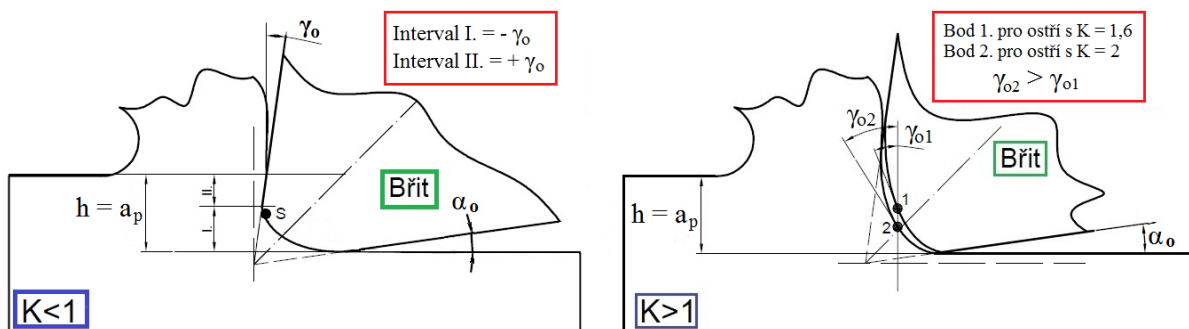
6.3.1 Analýza naměřených hodnot - řezné síly pro proměnné K

Analýza silového zatížení musí opět vycházet ze skutečného tvaru ostří a polohy stagnačního bodu. Z rešerše literatury [56, 57 a 58] vyplynulo, že:

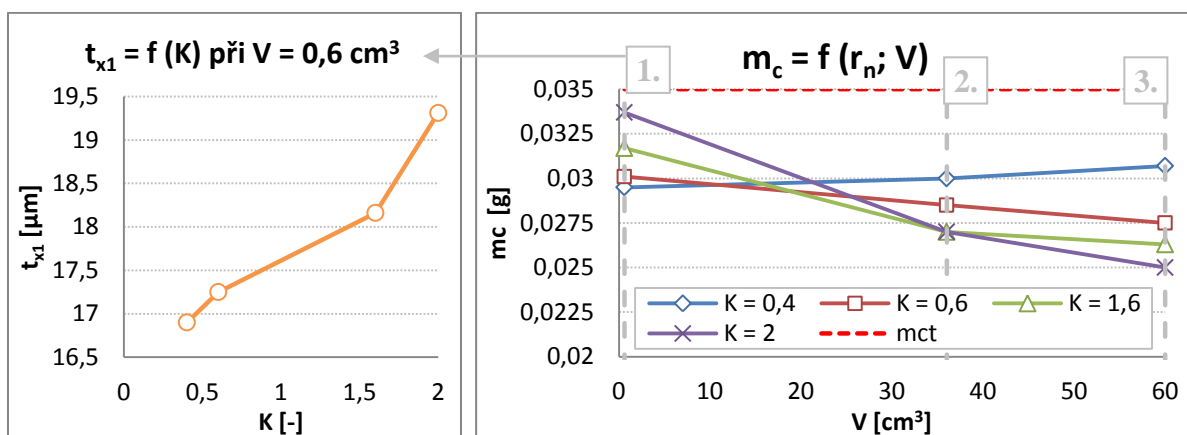
- čím $K > 1$, tím S blíže k hřbetu \rightarrow větší t_{x1}
- čím $K < 1$, tím S blíže k čelu \rightarrow menší t_{x1}

Schéma záběrových podmínek, pro různé K , je zobrazeno na obr. 6-37. Potvrzení pravdivosti tvrzení o poloze bodu S vzhledem k hodnotě K je provedeno na základě měření hmotnosti třísek, které byly odebrány ihned při prvním řezu. Výsledky hmotnostního měření (graf na obr. 6-38) předpoklad potvrzují. Při $V = 0,6 \text{ cm}^3$ pro $K = 2$ dosahuje hmotnost třísky (m_c) téměř teoretické hmotnosti třísky (m_{ct}) $\rightarrow m_c \approx m_{ct} \rightarrow$ došlo k odříznutí téměř veškerého obráběného materiálu při jednom řezu řezného břitů. Se snižujícím se K (při $V = 0,6 \text{ cm}^3$) je m_c klesající, tzn., že poloha stagnačního bodu přechází od hřbetu k čelu nástroje, tj. mění se skutečná tloušťka odřezávané vrstvy. Se zvyšujícím V se řezný břit opotřebává a tím dochází ke změně:

- skutečného tvaru profilu řezného břitů,
- polohy stagnačního bodu,
- skutečné tloušťky odřezávané vrstvy.

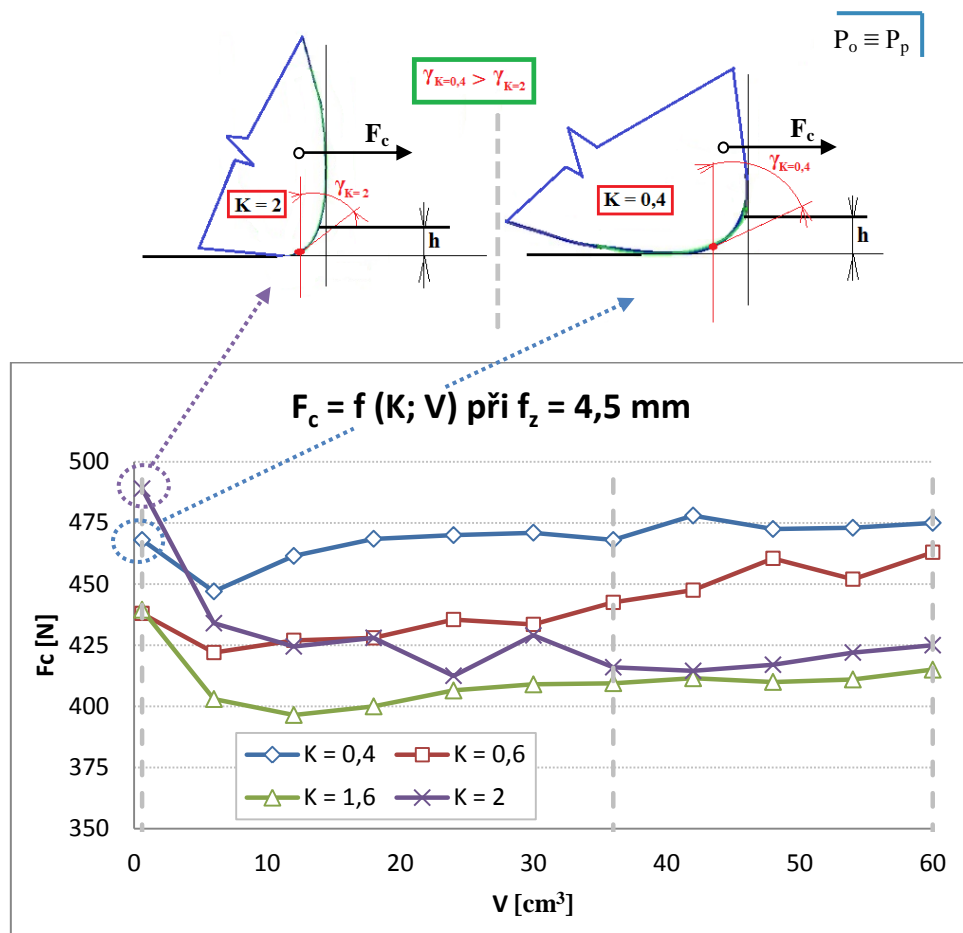


Obr. 6 - 37: Záběrové podmínky břitů s $K < 1$ a $K > 1$



Obr. 6 - 38: Vliv velikosti K na m_c a t_{x1} při $V = 0,6 \text{ cm}^3$

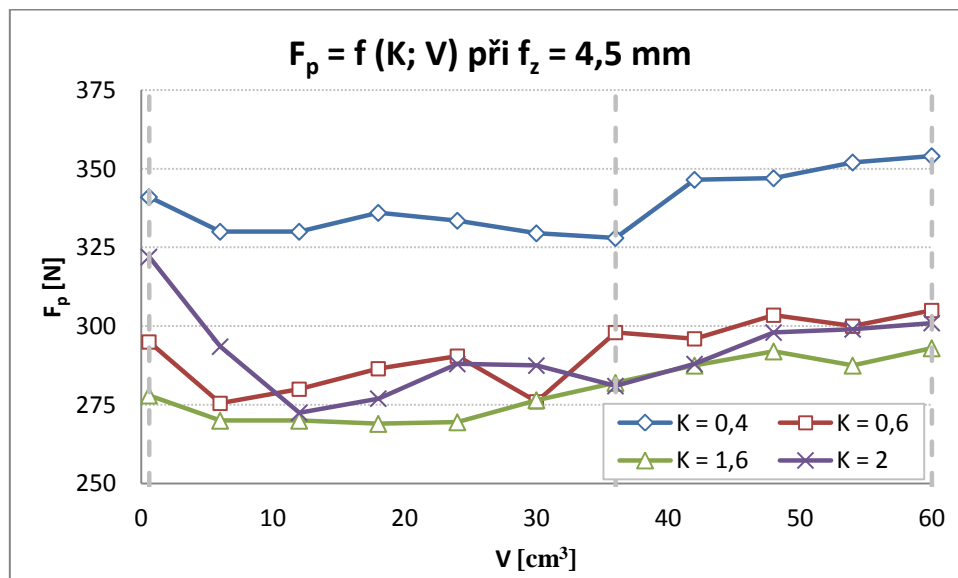
Nejmenší změna t_{x1} s V je pro nástroj s $K = 0,4$; t_{x1} byla dokonce narůstající se zvyšujícím se V . Vliv K a V na F_c a F_p je uveden v grafu na obr. 6-39 a 6-40.



Obr. 6 - 39: Vliv V a K na F_c

Při prvním řezu ($V = 0,6$ cm³) břitů bylo zjištěno:

- $F_{c_{K=2}} > F_{c_{K=0,4}} > F_{c_{K=1,6}} \approx F_{c_{K=0,6}}$
- $F_{p_{K=0,4}} > F_{p_{K=2}} > F_{p_{K=0,6}} > F_{p_{K=1,6}}$



Obr. 6 - 40: Vliv V a K na F_p

Ze zjištěných závislostí (obr. 6-39 a 6-40), pro $V = 0,6 \text{ cm}^3$, vyplývá následující:

- pokud je rozdíl mezi hodnotami $t_{xI} \geq 2,5 \mu\text{m} \rightarrow$ velikost F_c ovlivňuje především t_{xI} , vliv γ_i je menší
- pokud je rozdíl mezi hodnotami $t_{xI} \leq 2,5 \mu\text{m} \rightarrow$ velikost F_c ovlivňuje především γ_i , vliv t_{xI} je menší
- čím $\uparrow F_c$, tím $\uparrow F_p$, **POZOR!** u $S_a \gg S_\gamma$ je nutné započítat vliv velikosti tření hřbetu o obrobenou plochu
- při $V = 36 \text{ cm}^3$ je pro $K = 1,6$ a 2 dosaženo stejné tloušťky odřezávané vrstvy a taktéž stejné F_c a $F_p \rightarrow$ stejný profil ostří
- nejnižší F_c i F_p je dosaženo pro nástroj s $K = 1,6$

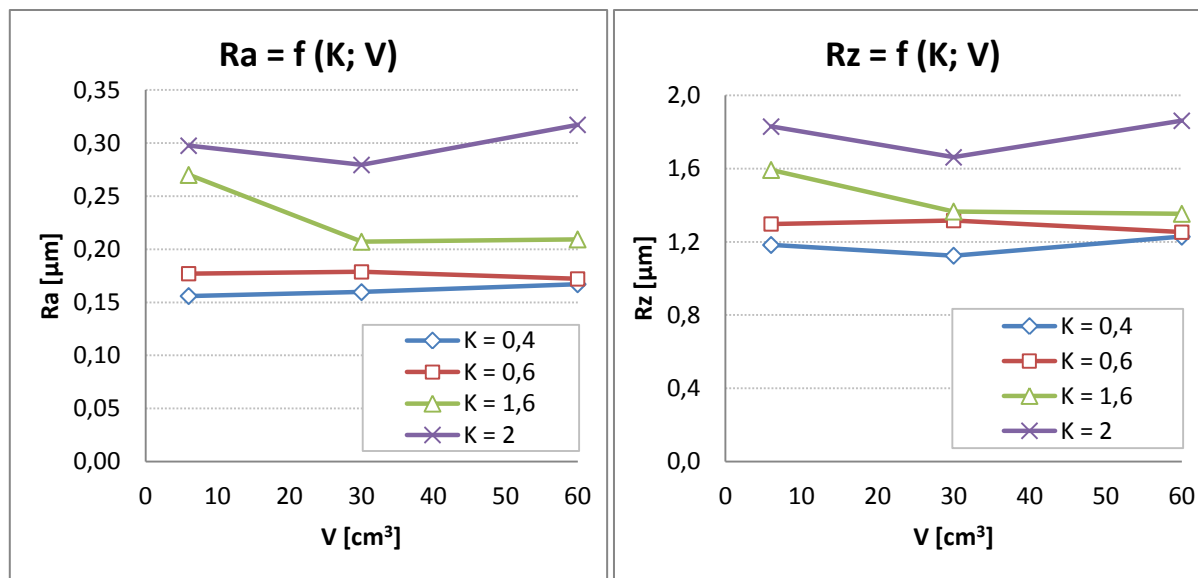
Při srovnávání průběhu m_c a F_c na V lze konstatovat následující:

- **K = 0,4:** m_c je narůstající s $V \rightarrow$ narůstá tedy $t_{xI} \rightarrow$ bod S se přesouvá blíže k hřbetu \rightarrow zaznamenán minimální nárůst F_c , s narůstajícím V , po celou dobu obrábění (vyjma $V = 6 \text{ cm}^3$, kdy došlo k „zařiznutí“ nástroje, tj. vytvoření profilu ostří, které se s V jen minimálně měnilo). Při $V = 36$ a 60 cm^3 mělo na F_c výraznější vliv t_{xI} než $\gamma_{K=0,4}$.
- **K = 0,6:** m_c je klesající s V , avšak F_c narůstá s $V \rightarrow$ klesá t_{xI} a projevuje se vliv $\gamma_{K=0,6}$ a $A_{\theta K=0,6}$.
- **K = 1,6:** m_c (tedy t_{xI}) je klesající s V a nárůst F_c s V je minimální \rightarrow vliv $\gamma_{K=1,6}$ minimální \rightarrow po zařiznutí si nástroj udržel profil a geometrii břitu.
- **K = 2:** pokles m_c s V je nejvýraznější. Do $V = 30 \text{ cm}^3$ F_c vyšší než F_c pro $K = 1,6 \rightarrow$ důvodem je vyšší t_{xI} . Mezi $V = 30$ až 48 cm^3 F_c srovnatelná s F_c pro $K = 1,6 \rightarrow$ stejné m_c , profil a geometrie břitu. Při $V = 48 \text{ cm}^3$ projevující se vliv $\gamma_{K=2}$.

6.3.2 Analýza naměřených hodnot - drsnost obrobeného povrchu pro proměnné K

Před vlastním zpracováním dat byla opětovně provedena M-S analýza, která vyloučila vliv místa naměru na drsnost obrobeného povrchu (viz příloha P12). Z průběhů jednotlivých drsností (viz obr. 6-41) vyplývá následující:

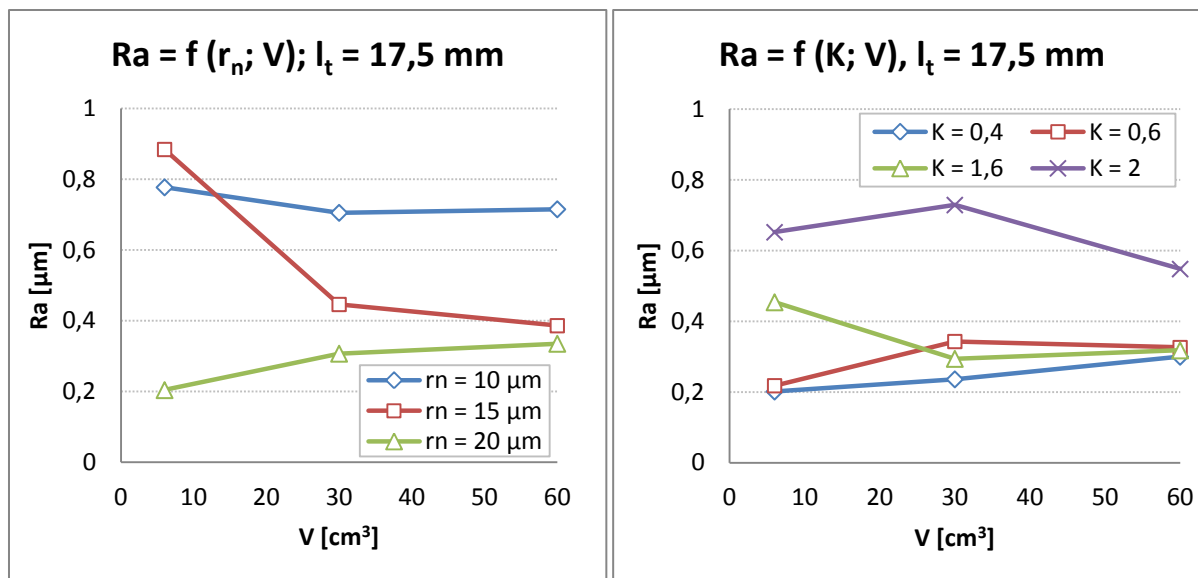
- přestože je s $K = 0,4$ dosaženo nejvyšší hodnoty F_c a F_p , tak dosahuje nejnižšího Ra a Rz , které je v průběhu celého obrábění téměř konstantní.
- o něco vyšší hodnoty Ra a Rz je dosaženo nástrojem s $K = 0,6$ (v porovnání s $K = 0,4$). Zároveň byly opět konstantní hodnoty Ra a Rz v průběhu celého obrábění.
- čím $\uparrow K$, tím $\uparrow Ra$ i Rz
- $K < 1$ má prokazatelně vyšší vliv na nižší Ra a Rz než $K > 1$. U $K = 0,4$ je styčná plocha hřbetu nástroje s obrobenou plochou mnohem větší než u nástroje s $K = 2$. Styčná plocha zajistila hladící efekt.
- $K > 1$ vedlo k vydrolení částí řezného břitu a tím vyšších hodnot Ra a Rz



Obr. 6 - 41: Vliv faktoru symetričnosti a objemu odebraného materiálu na drsnost obrobeného povrchu

Při vyšetřování vlivu r_n na drsnost obrobeného povrchu bylo zjištěno, že je důležité sledovat křivku profilu povrchu. Bohužel při vyšetřování vlivu K na řezivost nástroje byl použit jiný typ drsnoměru. Konkrétně se jednalo o drsnoměr Mitutoyo SurfTest SJ - 210 (specifikace viz příloha P3.1), který neumožňoval digitální uložení křivky profilu. Jedinou možností, jak zhodnotit obrobený povrch, je pomocí drsnosti Ra naměřené na nejvyšší možné délce dráhy snímacího hrotu, tj. $l_t = 17,5$ mm a tento záznam porovnat s výsledky Ra pro proměnné r_n . Uvedené grafy jsou zobrazeny na obr. 6-42. Obrobený povrch nástrojem s $r_n = 20$ μm byl vyhodnocen jako nejlepší z hlediska jednotnosti povrchu a rovnoměrného rozložení vrcholů a rýh. Jeho průběh Ra v závislosti na V je rovnoměrně rostoucí, tzn. žádný extrémní pokles mezi jednotlivými místy náměru a zároveň Ra při $l_t = 5,6$ mm $\approx Ra$ při $l_t = 17,5$ mm (Obr. 6 - 30, str. 69).

Stejným způsobem je hodnocen finální povrch po obrobení nástroji s proměnným K . Nejmenší změny Ra , při porovnání jednotlivých l_t , je dosaženo nástrojem s $K = 0,4$. Čím vyšší K , tím vyšší Ra a tím pádem horší topografie obrobeného povrchu. Lze tedy očekávat, že obrobený povrch nástrojem s $K = 0,4$ bude mít rovnoměrnější rozložení vrcholů a rýh než povrch obrobený nástrojem s $K = 2$.

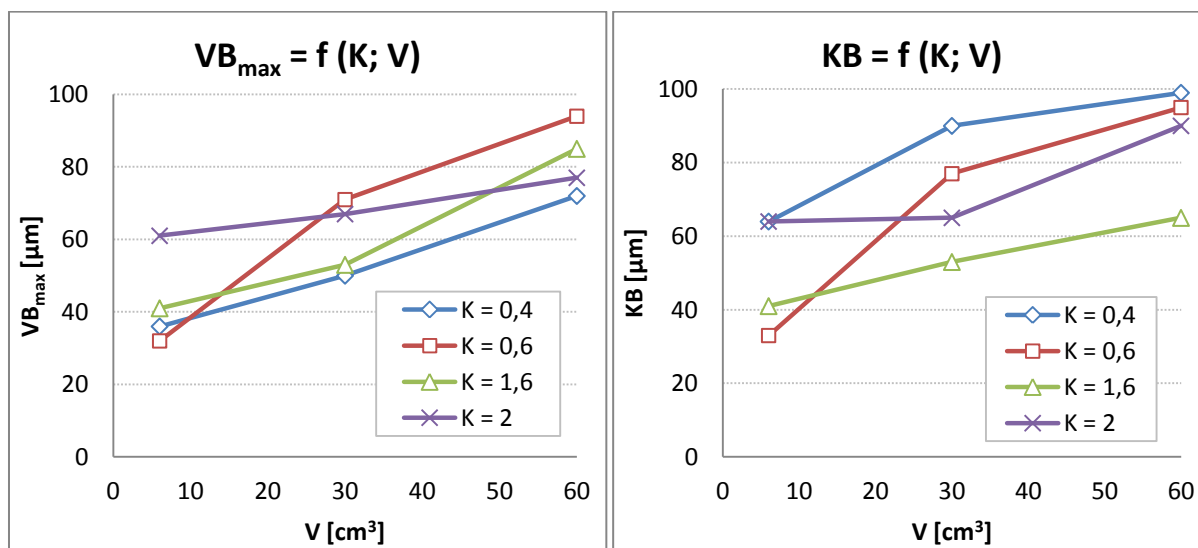


Obr. 6 - 42: Vliv r_n, K a V na Ra při l_t = 17,5mm

6.3.3 Analýza naměřených hodnot - opotřebení řezného nástroje s proměnným K

Průběhy opotřebení čela a hřbetu břitu v závislosti na K a V jsou zobrazeny v grafech na obr. 6-43. Zároveň z nich vyplývá následující:

- celkově nejnižšího opotřebení VB_{max} bylo dosaženo nástrojem s $K = 0,4$
- naopak na nástroji s $K = 0,4$ bylo naměřeno nejvyšší opotřebení KB
- nejnižší opotřebení KB bylo dosaženo nástrojem s $K = 1,6$
- pro vysvětlení vlivu K na drsnost obrobeneho povrchu je nutné určit charakter opotřebení a jeho vliv na tvar profilu řezného břitu



Obr. 6 - 43: Vliv faktoru symetričnosti ostří a objemu odebraného materiálu na velikost opotřebení na hřbetě a čele řezného nástroje

V průběhu obrábění bylo možné na řezných břitech zaznamenat abrazivní opotřebení, které se zvyšujícím se V přecházelo do lokálního vydrolení částí břitu. Vliv charakteru opotřebení na drsnost obrobeného povrchu bude vysvětlen opět na dvou extrémních případech:

- $K = 0,4$: $S_a \gg S_\gamma$, v okamžiku vydrolení částí řezného břitu vznikla ploška na ostří s negativním efektivním úlem čela, bod S se posunul blíže k hřbetu, vzrostla t_{x1} a část plochy S_a zůstala zachována. Je tedy opět možné usuzovat na vznik „plošky“, která zachovala funkci řezného břitu a zajistila hladící účinek. Negativní efektivní úhel čela plošky na ostří zvýšil pevnost řezného břitu.
- $K = 2$: $S_\gamma \gg S_a$, porovnáním profilu břitu pro $K > 1$ a $K < 1$ z Obr. 6 - 37, str. 75 je patrné, že v kontaktu s obrobenou plochou je menší část hřbetu. Kontakt probíhá na bodové, nikoliv plošné úrovni jak je tomu u $K = 0,4$. Při bodovém kontaktu dochází k lokální koncentraci napětí a následnému vydrolení částí hřbetu břitu. Vydrolení způsobuje „ústup“ hřbetu, posun bodu S blíže k čelu a pokles t_{x1} . Zároveň na hřbetu vzniká „ploška“, která je vydrolená (místně poškozená), což ovlivňuje drsnost obrobeného povrchu.
- $K = 0,6$ a $1,6$ tvoří přechod mezi dvěma extrémními stavy.

6.3.4 Shrnutí dosažených výsledků pro proměnné K

Cílem kapitoly 6.3 bylo určení vlivu velikosti K na vybrané parametry řezného procesu. Bylo zjištěno, že cílenou změnou K je možné ovlivnit především silové zatížení řezného břitu a drsnost obrobeného povrchu. Dosažené výsledky je možné shrnout do následujících bodů:

- velikost K ovlivňuje polohu S na ostří a tím t_{x1} . Čím $\uparrow K$, tím je bod S blíže k hřbetu břitu a tím narůstá t_{x1} . Naopak čím $\downarrow K$, tím je bod S umístěn blíže k čelu břitu. Rozdíl v poloze bodu S pro dva extrémní případy, tj. $K = 0,4$ a $K = 2$, činí přibližně $2,5 \mu\text{m}$.
- velikost F_c , pro nový/nezařiznutý břit, je ovlivněna především velikostí t_{x1} . Pokud je rozdíl mezi jednotlivými $t_{x1} \geq 2,5 \mu\text{m}$, tak dominantní vliv na F_c má t_{x1} . Jakmile rozdíl mezi jednotlivými $t_{x1} < 2,5 \mu\text{m}$, tak dominantní vliv na F_c má negativní efektivní úhel čela plošky na ostří, θ a A_θ .
- Velikost F_c ovlivňuje velikost F_p . F_p je zároveň ovlivněna velikostí S_a . U $K = 0,4$ se dá očekávat nejvyšší „kontaktní“ plocha hřbetu břitu s obrobenou plochou. Kontaktní plocha způsobuje tření, které je součástí síly F_p . Proto je F_p pro $K = 0,4$ nejvyšší.
- se zvyšujícím se V dochází nejprve k zařiznutí a následně k postupnému opotřebení řezného břitu, které mění skutečný tvar profilu břitu. S narůstajícím VB_{max} a KB dochází ke zmenšení t_{x1} kromě nástroje s $K = 0,4$ (zde dochází k nepatrnému nárůstu t_{x1}).
- řezné břity se opotřebovávaly ve formě abraze s místním vydrolením částí řezného břitu. Vydrolení u nástroje s $K > 1$ zapříčinilo vyšší hodnoty Ra a Rz a pravděpodobně i horší topografii obrobeného povrchu. Naopak nástroje s $K < 1$

dosáhly nižších hodnot **Ra** a **Rz** a to v průběhu celého obrábění (od okamžiku prvního kontaktu nástroje s obrobkem až po dosažení $V = 60 \text{ cm}^3$).

- nástroje s $K > 1$ budou mít vyšší sklon k vydrolování částí řezného břitu, neboť hodnota drsnosti na ostří **Rsa** a **Rsz** je mnohem vyšší než pro $K < 1$. Vyšší hodnoty **Rsa** a **Rsz** v kombinaci s bodovým kontaktem břitu s obrobenou plochou způsobují lokální koncentraci napětí, která způsobí vydrolení částí řezného břitu.
- nástroje s $K < 1$ mají nižší **Rsa** a **Rsz** a separační bod leží v části, kde má břit nejvyšší pevnost. Přesto i zde dochází k vydrolování částí ostří, které zasahuje více čelo než hřbet.

6.4 DODATEK K EXPERIMENTÁLNÍ ČINNOSTI ZAMĚŘENÉ NA ZVYŠOVÁNÍ ŘEZIVOSTI NÁSTROJE

Původně jedním z dílčích cílů disertační práce bylo vyjádření vlivu různých technologických způsobů úpravy VBD na řezivost nástroje. Poptány a realizovány byly úpravy mokrým a suchým pískováním a laserem. Bohužel se ani jednou technologií nepodařilo dosáhnout stejné hodnoty r_n (viz *tab. 6-15*) a jak bylo prokázáno v *kapitole 6.2*, sledované a vyhodnocované parametry jsou závislé právě na něm. Vzájemné porovnání naměřených dat bylo tudíž bezpředmětné.

Tab. 6 - 15: Parametry ostří upravené různými technologiemi

Technologie	r_n [μm]
Suché pískování	9,1 ÷ 10,6
Mokré pískování	12,3 ÷ 13,9
Laser	4,1 ÷ 4,4

Druhým problémem, který byl zaznamenán, je nevhodně zvolená technologie laserové úpravy. Požadavek na tento typ technologie vznikl v době, kdy nebylo k dispozici mnoho informací věnujících se této problematice a úprava laserem byla na českém trhu ještě „v plenkách“. V současné době již existuje řada publikací věnujících se této oblasti a zároveň probíhá rozsáhlá vědecko-výzkumná činnost na toto téma. Nevhodně zvolený laserový zdroj (konkrétně vlnová délka, délka pulsu a doba tepelné difúze) způsobil, že teplo vnesené do substrátu difundovalo do okolí.

Tepelná difúze snižuje účinnost laserového zpracování a ve výsledku může způsobit vznik nečistot (ve formě neodpařených kapek materiálu) na povrchu substrátu, které nepříznivě ovlivňují okolí a kvalitu obrobeného povrchu substrátu. Dále vznikají tepelně ovlivněné zóny (HAZ), které mají přímý vliv na mechanické vlastnosti substrátu a vznik mikrotrhlin. S HAZ souvisí také tvorba tzv. přetavené vrstvy. Jedná se o znovu ztuhlý materiál, který má odlišné fyzikální vlastnosti od základního substrátu. [60]

Bohužel nevhodně zvolený laserový zdroj byl použit pro úpravu destiček IN04S. Hodnoty uvedené v *tab. 6-15* napovídají o tom, že nedošlo k úpravě ostří ve formě odebrání materiálu, ale pouze k tepelnému ovlivnění/přetavení ostří. Nevhodně zvolená technologie úpravy se samozřejmě projevila během experimentálního obrábění a měla nepříznivý vliv na mechanické vlastnosti řezného břitu, což se projevilo ve formě zkřehnutí řezného břitu.

7. CELKOVÉ SHRNUTÍ, DISKUZE VÝSLEDKŮ A ZÁVĚR

7.1 SHRNUTÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ

Tématem disertační práce je zvyšování řezivosti nástroje při dokončovacím frézování oceli P91. Řezivost nástroje je možné cíleně ovlivnit vhodnými úpravami řezného břitu. Obecný přínos úpravy r_n a K byl popsán v kapitole 4 a shrnut v podkapitole 4.1. Z literární rešerše však vyvstala řada otázek, na které se tato práce pokusila odpovědět.

7.1.1 Vliv r_n na řezivost nástroje

Prvním sledovaným parametrem byl poloměr zaoblení ostří. Jeho optimální velikost je závislá na obráběném materiálu, řezném materiálu a technologii obrábění. Maximální velikost r_n byla stanovena s ohledem na tloušťku odřezávané vrstvy (dle geometrie nástroje je $h = a_p$), tedy $r_{ni} \leq 20 \mu\text{m}$.

Obecný předpoklad platný pro skupinu materiálů¹¹ vyšetřovanou v kapitole 4

Se zvyšujícím se r_n :

- narůstá trvanlivost,
- mění se způsob opotřebení – z vydrolování částí řezného břitu na čistě abrazivní,
- narůstá především síla F_f , F_c je méně citlivá na změny r_n ,
- je Ra i Rz narůstající, případně není zaznamenán výrazný vliv r_n na Ra (Rz).

Doporučený rozsah r_n je $20 \div 30 \mu\text{m}$. To vše platí pro případ, kdy $h \gg r_n$.

Experimentální zjištění konfrontovaná s obecnými předpoklady

Ve skutečnosti je nutné brát v úvahu polohu stagnačního bodu a s ním spojenou skutečnou tloušťku odřezávané vrstvy. Níže uvedená konstatování jsou platná pro $r_n = 5 \div 20 \mu\text{m}$ a $h = 20 \mu\text{m}$.

- Se zvyšujícím r_n se mění charakter opotřebení řezného břitu. Při nižším r_n převládá vydrolování částí řezného břitu, se zvyšujícím se r_n se mění na žádoucí typ opotřebení, a to abrazivní. Abrazivní otěr čela i hřbetu lze označit za přípustný typ opotřebení, neboť je bezpečný, předvídatelný a je s ním dosaženo vyšší opakovatelnosti výsledku.

Experimentální zjištění odpovídají teoretickým (obecným) předpokladům.

- Se zvyšujícím se r_n klesá F_c , neboť klesá skutečná tloušťka odřezávané vrstvy. To však platí do určité hodnoty t_{xI} , poté je F_c narůstající, neboť se projevuje vliv negativního efektivního úhlu čela plošky na ostří, velikosti A_θ a θ . Experimentálně bylo prokázáno, že takto definovaného „ideálního“ stavu je dosaženo pouze po velmi krátký časový okamžik. Břit se v průběhu obrábění opotřebovává a tím se mění profil ostří a s ním související parametry (t_{xI} , A_θ , θ apod.), které ovlivňují velikost F_c .
- F_p je narůstající se zvyšujícím se r_n . Čím $\uparrow F_c$, tím $\uparrow F_p$. Síla F_p zahrnuje tření hřbetu břitu o obrobenou plochu.

¹¹ Vyšetřované materiály: ocel C45; ocel 42CrMo4; nízkolegovaná ušlechtilá mangan-chromová ocel k cementování 20MnCr5; litina; slitina typu Ti-48Al-2Cr-2Nb; slitina Ti-6Al-4V

Při vyšetřování vlivu r_n na F_c a F_p je ve skutečnosti nutné brát v potaz již několikrát zmiňované opotřebení řezného břitu. Nástroj, který na začátku obrábění vykazuje nejvyšší F_c i F_p , má obvykle nejnižší silové zatížení po obrobení požadovaného V .

Při porovnání grafu na obr. 6-23 a 6-26 lze konstatovat, že F_c je stejně citlivá na změny r_n jako F_p , což je v rozporu se závěry výzkumu Wyen a Wegener [10].

- Zvyšující se r_n snižuje R_a i R_z a zlepšuje topografii obrobeného povrchu. Zároveň zajišťuje menší rozdíly drsnosti obrobeného povrchu na začátku a konci obrábění.
- Čím $\uparrow r_n$, tím \uparrow spolehlivost řezného procesu.

Na základě experimentálního zjištění je možné potvrdit, že $r_n = 20 \mu\text{m}$ je vhodnou volbou pro frézování oceli P91. S tímto nástrojem bude zajištěna spolehlivost řezného procesu a opakovatelnost výsledku.

7.1.2 Vliv K na řezivost nástroje

Druhá část práce byla věnována vlivu K na řezivost nástroje. Do současné chvíle je v literárních zdrojích dostatečně zmapován vliv K především na trvanlivost řezného břitu pro $h \gg S_a$ a S_γ . Proto vyvstává otázka, zda přináší změna K , při velmi malém h , nějaká zlepšení v oblasti řezivosti nástroje? Pokud ano, tak konkrétně jaká?

Obecný předpoklad platný pro skupinu materiálů¹² vyšetřovanou v kapitole 4

Obecné závěry platné pro $h \gg S_a$ a S_γ :

- $K > 1$ poloha bodu S blíže k hřbetu břitu,
- $K < 1$ poloha bodu S blíže k čelu břitu,
- při zvyšování S_a narůstá velikost jednotlivých složek řezných sil,
- změna S_γ nemá výrazný vliv na velikost jednotlivých složek řezných sil,
- $K > 1$ vhodné pro přerušovaný řez,
- $K < 1$ vhodné pro nepřerušovaný řez.

Experimentální zjištění konfrontovaná s obecnými předpoklady

Tak jako v předcházejícím případě, tak i zde je nutné uvažovat s polohou stagnačního bodu na ostří v kombinaci s velmi malou tloušťkou odřezávané vrstvy ($h = 20 \mu\text{m}$). Experimentální zjištění jsou následující:

- Poloha bodu S na ostří odpovídá teoretickým předpokladům, nicméně je nevhodně prezentována v literárních zdrojích, ze kterých čtenář může nabýt dojmu, že se snižujícím se K extrémně klesá skutečná tloušťka odřezávané vrstvy. Rozdíl mezi polohou bodu S pro $K = 0,4$ a $K = 2$ činí $2,5 \mu\text{m}$, přičemž s $K = 2$ je téměř dosaženo $t_{x1} = h$.
- Velikost F_c je ovlivněna především t_{x1} . Pokud je rozdíl mezi hodnotami $t_{x1} > 2,5 \mu\text{m}$, tak je F_c ovlivněna především skutečnou tloušťkou odřezávané vrstvy \rightarrow čím větší t_{x1} , tím $\uparrow F_c$. Jestliže je zmiňovaný rozdíl $< 2,5 \mu\text{m}$, tak je velikost F_c ovlivněna - γ_i , A_θ a θ . Velikost F_p je ovlivněna F_c a S_a . Pokud je $S_a \gg S_\gamma$, tak F_p zahrnuje velikost tření hřbetu o obrobenou plochu.

¹² Vyšetřované materiály: C45 a 42CrMo4

Změna S_γ , tedy má vliv na velikost jednotlivých složek řezných sil a stejně tak S_α . Velikost vlivu F_c je srovnatelná s F_p .

- Způsob opotřebení řezného břitu je totožný pro $K > 1$ i $K < 1$. Nejprve dochází k čisté abrazi, která postupně přechází k vydrolování částí řezného břitu. Vydrolení u nástroje s $S_\alpha \gg S_\gamma$ nezasahuje celou plochu S_α , a proto zůstává zachována funkce řezného břitu. Dále bylo vyzpozorováno, že pro $K > 1$ je R_{sa} a R_{sz} větší než pro $K < 1$, což může mít negativní vliv na vyšší sklon k vydrolování částí řezného břitu.

Volba vhodného K by neměla být zobecněna, ale měla by být vztahována ke konkrétním technologickým požadavkům například z hlediska silového zatížení řezného břitu nebo výsledné kvality obrobeného povrchu.

- Vliv K na drsnost obrobeného povrchu není v současné chvíli zmapován. Experimentálně bylo zjištěno, že čím je K menší než 1, tím nižších hodnot drsnosti obrobeného povrchu je dosaženo (hladící efekt je zachován po delší dobu). Křivka profilu povrchu taktéž vypovídá o lepší topografii obrobeného povrchu pro nástroj s $K \ll 1$.
- Způsob opotřebení ovlivňuje tvar řezného břitu, což má ve výsledku vliv na všechny sledované parametry řezného procesu. Nelze tedy obecně stanovit, že například nástrojem s $K = 2$ bude dosaženo nejvyšší F_c po celou dobu obrábění.

7.1.3 Porovnání dosažených výsledků pro $K \approx 1$ a $K \neq 1$

Z výsledků experimentálního studia vyplynulo, že volbou K lze ovlivnit všechny sledované parametry. Nejvýznamnějším z nich je způsob opotřebení řezného břitu, který mění tvar profilu ostří a tím ovlivňuje:

- skutečnou tloušťku odřezávané vrstvy a s tím související silové zatížení řezného břitu,
- topografii a drsnost obrobeného povrchu.

Na základě požadavků na funkční vlastnosti VBD s wiper geometrií (nejnižší R_a obrobeného povrchu) a požadavcích na kvalitu obrobeného povrchu byly vybrány dva představitelé, jejichž dosažené výsledky jsou srovnatelné.

- Představitel č. 1: $K = 0,4$
- Představitel č. 2: $K \approx 1$ s $r_n = 20 \mu\text{m}$

Pozornost je nutné věnovat nástroji s $K = 0,4$ neboť skutečná tloušťka odřezávané vrstvy je do $V = 30 \text{ cm}^3$ menší než u nástroje s $K \approx 1$. Zároveň - $\gamma_{i_K = 0,4} \gg - \gamma_{i_K = 1}$. Lze tedy předpokládat zatlačování obráběného materiálu pod řezný břit a tím větší tloušťku zpevněné vrstvy obrobeného povrchu. Jelikož se jedná o dokončování, tedy **finální operaci**, tak by velikost zpevnění neměla mít výrazný vliv, případně pouze pozitivní, na funkční vlastnosti obrobeného povrchu. Plasticky deformovaná zpevněná vrstva bude obsahovat tlaková pnutí při povrchu a tahová pnutí pod nimi, což zvyšuje mez únavy, odolnost obrobeného povrchu proti mechanickému opotřebení a zlepšuje ochranu proti korozi [71]. Na druhou stranu, v případě potřeby opětovně obrobít takto zpevněný povrch může vyvstat problém se sníženou trvanlivostí řezného břitu. Toto tvrzení do jisté míry vysvětluje vydrolování částí řezného břitu u nástroje s $K = 0,4$, neboť nástroj po celou dobu obrábění (kromě prvních dvou řezů) odřezával zpevněnou vrstvu (viz schéma zátěžových podmínek, str. 41).

Na základě experimentálních zjištění a závěrů této disertační práce se rozkrývá další oblast potenciálního výzkumu zaměřená na:

- Stanovení hranice poměru h/r_n a její vliv na stav obrobeného povrchu se zaměřením na zpevnění povrchové vrstvy
- Dynamiku řezného procesu a její vliv na vybrané parametry

7.2 ZÁVĚR

Hlavním cílem disertační práce bylo popsat vliv různých způsobů úpravy mikro-geometrie břitu na řezivost nástroje IN04S při dokončovacím frézování oceli P91. Zvyšování řezivosti nástrojů, pomocí úpravy mikro-geometrie řezného břitu, je moderním trendem poslední doby. Výrobci řezných nástrojů si tuto skutečnost uvědomují a zařazují ji do výrobního řetězce. Technologie realizované úpravy ostří se liší v závislosti na typu nástroje. Ostří na vyměnitelných břitových destičkách je nejčastěji pískováno nebo kartáčováno. U monolitních nástrojů se jedná o vlečné omílání nebo kartáčování. Z výsledků literární rešerše (*kapitola 4*) vyplynulo, že optimální hodnota r_n a K je přímo závislá na:

- řezném materiálu,
- obráběném materiálu,
- technologii obrábění apod.

Optimalizovat hodnotu r_n a K je tedy možné pro konkrétní technologický případ. Pro účely této disertační práce byla zvolena VBD s tzv. wiper geometrií, kde κ_r se blíží 0° a $a_p = h$. Prvním krokem bylo nalezení vhodných řezných podmínek pro originální VBD. Následovala volba proměnného r_n , jehož horní hranice byla limitována axiální hloubkou řezu. Experimentálně bylo prokázáno, že se zvyšujícím se r_n dochází ke zpevňování řezného břitu, které se projeví příznivější formou opotřebení, a to abrazivním otěrem čela a hřbetu břitu. Abrazivní otěr je forma opotřebení, kterou lze považovat za bezpečnou, předvídatelnou a je s ním dosaženo vyšší opakovatelnosti výsledku. Velikost opotřebení ovlivňuje tvar profilu ostří a tím mění skutečnou tloušťku odřezávané vrstvy, což se ve výsledku projeví na silovém zatížení řezného břitu a kvalitě obrobeného povrchu. Čím vyšší r_n (ve sledovaném intervalu $5 \div 20 \mu\text{m}$), tím rovnoměrnější silové zatížení na začátku a na konci obrábění a taktéž vyšší kvalita obrobeného povrchu (jak z hlediska Ra , tak topografie).

Vhodnou úpravou faktoru symetričnosti je možné ovlivnit velikost F_c a Ra . Experimentální studium prokázalo, že $0,4 \leq K < 1$ má pozitivnější vliv na kvalitu obrobeného povrchu než $1 < K \leq 2$. U $0,4 \leq K < 1$ je však nutné počítat s vyšším F_c a větší tloušťkou zatlačované vrstvy (h_s), která ovlivňuje velikost zpevněné vrstvy obrobeného povrchu. Opotřebení řezného břitu mění profil ostří mnohem výrazněji než u $K \approx 1$.

Pro praktickou aplikaci, tj. frézování dělicí roviny tělesa parní turbíny, lze doporučit úpravu: $K \approx 1$ a $r_n \approx 20 \mu\text{m}$. V případě, že by řezivost nástroje byla zvyšována depozicí tenké vrstvy TiAlN (jak je tomu u nástroje IN2004), tak o její tloušťku bude nutné snížit r_n . Zároveň by bylo vhodné změnit přístup k měření drsnosti obrobeného povrchu, případně jej rozšířit o další vyhodnocované parametry (například o Abbottovu křivku).

8. POUŽITÁ LITERATURA

[1] DENKENA, B., KOEHLER, J., REHE, M.: *Influence of the Honed Cutting Edge on Tool Wear and Surface Integrity in Slot Milling of 42CrMo4 Steel*. 5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012. 2012, č. 1 [cit. 2013-08-15]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827112000340>.

[2] YUSSEFIAN, N.Z., KOSHY, P.: *Parametric characterization of the geometry of honed cutting edges*. *Precision Engineering*. 2013, vol. 37, issue 3, s. 746-752 [cit. 2015-01-27]. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2013.02.007. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141635913000482>.

[3] BASSETT, E., KÖHLER, J., DENKENA, B.: *On the honed cutting edge and its side effects during orthogonal turning operations of AISI1045 with coated WC-Co inserts*. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2012, vol. 5, issue 2, s. 108-126 [cit. 2014-11-13]. DOI: 10.1016/j.cirpj.2012.03.004. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1755581712000193>.

[4] ISHIMARUA, D., TOUGEA, M., MUTAA, H., KUBOTA, A., SAKAMOTO, T., SAKAMOTO, S.: *Burr Suppression Using Sharpened Pcd Cutting Edge by Ultraviolet-Ray Irradiation Assisted Polishing*. *Procedia CIRP*. 2012, vol. 1, s. 184-189 [cit. 2015-01-27]. DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.032. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827112000339>.

[5] BIERMANN, D., WOLF, M., AßMUTH, R.: *Cutting Edge Preparation to Enhance the Performance of Single Lip Deep Hole Drills*. *Procedia CIRP*. 2012, vol. 1, s. 172-177 [cit. 2015-01-27]. DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.030. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827112000315>.

[6] DENKENA, B., KÖHLER, J., MENGESHA, M.S.: *Influence of the cutting edge rounding on the chip formation process: Part 1. Investigation of material flow, process forces, and cutting temperature*. *Production Engineering*. 2012, vol. 6, 4-5, s. 329-338 [cit. 2015-01-27]. DOI: 10.1007/s11740-012-0366-x. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11740-012-0366-x>.

[7] DENKENA, B., KÖHLER, J., VENTURA, C.E.H.: *Customized cutting edge preparation by means of grinding*. *Precision Engineering*. 2013, vol. 37, issue 3, s. 590-598 [cit. 2015-01-27]. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2013.01.004. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141635913000093>.

[8] YUSSEFIAN, N.Z., KOSHY, P., BUCHHOLZ, S., KLOCKE, F.: *Electro-erosion edge honing of cutting tools*. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2010, vol. 59, issue 1, s. 215-218 [cit. 2015-01-27]. DOI: 10.1016/j.cirp.2010.03.009. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850610000107>.

[9] KARPUSCHEWSKI, B., SCHMIDT, K., PRILUKOVA, J., BEŇO, J., MAŇKOVÁ, I., HIEU, N.T.: *Influence of tool edge preparation on performance of ceramic tool inserts when hard turning*. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013, vol. 213, issue 11, s. 1978-1988 [cit. 2015-01-27]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.05.016. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013613001726>.

[10] WYEN, C.-F., WEGENER, K.: *Influence of cutting edge radius on cutting forces in machining titanium*. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2010, vol. 59, issue 1, s. 93-96 [cit. 2015-01-27]. DOI: 10.1016/j.cirp.2010.03.056. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850610000570>.

[11] DENKENA, B., FRIEMUTH, T., FEDORENKOAND, S., GROPE, M.: *An der Schneide wird das Geld verdient*. Neue Parameter zur Charakterisierung der Schneidengeometrien an Zerspanwerkzeugen, 2002, Werkzeuge- Sonderausgabe der Zeitschrift Fertigung, pp. 24–26.

[12] YUSSEFIAN, N.Z., KOSHY, P.: *Application of foil electrodes for electro-erosion edge honing of complex-shaped carbide inserts*. Journal of Materials Processing Technology. 2013, vol. 213, issue 3, s. 434-443 [cit. 2015-01-27]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.09.022. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013612002865>.

[13] DENKENA, B., KOEHLER, J., REHE, M.: *Influence of the Honed Cutting Edge on Tool Wear and Surface Integrity in Slot Milling of 42CrMo4 Steel*. Procedia CIRP. 2012, vol. 1, s. 190-195 [cit. 2015-01-27]. DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.033. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827112000340>.

[14] WYEN, C.-F., KNAPP, W., WEGENER, K.: *A new method for the characterisation of rounded cutting edges*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2012, vol. 59, 9-12, s. 899-914 [cit. 2015-01-27]. DOI: 10.1007/s00170-011-3555-4. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-011-3555-4>.

[15] DENKENA, B., BIERMANN, D.: *Cutting edge geometries*. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2014, 63(2), 631-653 [cit. 2016-01-25]. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.009. ISSN 00078506. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850614001917>.

[16] *Platit Compendium 2011*. In [online]. [s.l.] : [s.n.], 2011 [cit. 2011-10-24]. Dostupné z WWW: <http://www.platit.com/files/Compendium_ev46_preview.pdf>.

[17] *Cutting Tool Edge Preparation – SME Technical Paper*. Conicity Technologies [online]. 2014 [cit. 2015-01-28]. Dostupné z: <http://conicity.com/2014/01/20/cutting-tool-edge-preparation-sme-technical-paper/>.

[18] YEN, Y.-C., JAIN, A., ALTAN, T.: *A finite element analysis of orthogonal machining using different tool edge geometries*. In Journal of Materials Processing Technology 146. [s.l.] : Elsevier, 2004 [cit. 2011-10-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S09240152300846X>>.

[19] ÖZEL, T., KARPAT, Y., SRIVASTAVA, A.: *Hard turning with variable micro-geometry PcBN tools*. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2008, vol. 57, issue 1, s. 73-76 [cit. 2015-01-28]. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.03.063. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850608001297>.

[20] FANG, N., WU, Q.: *The effects of chamfered and honed tool edge geometry in machining of three aluminum alloys*. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2005, vol. 45, issue 10, s. 1178-1187 [cit. 2014-11-12]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.12.003. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695504003207>.

[21] RODRÍGUEZ, C. J. C.: *Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing*. Kassel : [s.n.], 2009 [cit. 2011-10-24]. Mesogeometry of the cutting edge . Dostupné z WWW: <www.uni-kassel.de>. ISBN 978-3-89958-713-5.

[22] ÖZEL, T.: *Computational modelling of 3D turning: Influence of edge micro-geometry on forces, stresses, friction and tool wear in PCBN tooling*. Journal of Materials Processing Technology. 2009, vol. 209, issue 11, s. 5167-5177 [cit. 2014-11-12]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.03.002. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013609000922>.

[23] YEN, Y.-C., JAIN, A., ALTAN, T.: *A finite element analysis of orthogonal machining using different tool edge geometries*. Journal of Materials Processing Technology . 2004, vol. 146, issue 1, s. 72-81 [cit. 2014-11-12]. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00846-X. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092401360300846X>.

[24] BYRNE, G., DORNFELD, D., DENKENA, B.: *Advancing Cutting Technology*. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2003, vol. 52, issue 2, s. 483-507 [cit. 2014-11-12]. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60200-5. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607602005>.

[25] DENKENA, B., LUCAS, A., BASSETT, E.: *Effects of the cutting edge microgeometry on tool wear and its thermo-mechanical load*. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2011, vol. 60, issue 1, s. 73-76 [cit. 2014-11-12]. DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.098. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850611000990>.

[26] DUSIL, M.: *Příprava řezného nástroje před povlakováním*. Brno, 2010. 39 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z WWW: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/18020/2010_BP_Michal_Musil_101487_Priva_rezneho_mat.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

[27] DENKENA, B., LEÓN-GARCÍA, L., BASSETT, E.: *Preparation of designed cutting edge microgeometries by simultaneous 5-axes brushing*. In Proceedings of the 3rd International Conference on Manufacturing Engineering. 2008 [cit. 2011-10-2]. Dostupné z WWW: <<http://ithaki.meng.auth.gr/data/ICMEN2008PDF/01-CUGR08.pdf>> : autor neznámý.

[28] *Platit Compendium*. 2014, In [online]. [s.l.] : [s.n.], 2014 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z WWW: <http://www.platit.com/sites/default/files/pdf/compendium_ev54b_lowres.pdf>.

[29] *The Importance of Cutting Edge Preparation In Metal Cutting Technology*. In OTEC Präzisionsfinish [online]. [s.l.] : [s.n.], 2006 [cit. 2011-10-24]. Dostupné z WWW: <www.edeltec.com>.

[30] *Perishable Items: Replacement Edge Prep Brushes*. Mutschler Edge Technologies [online]. 2012 [cit. 2015-01-28]. Dostupné z: <http://www.mutschleredgetech.com/perishable-items.php>.

[31] *Perfect surface of metal cutting tools*. Docstoc [online]. 2013 [cit. 2015-01-28]. Dostupné z: <http://www.docstoc.com/docs/163119422/Perfect-Surfaces-of-Metal-Cutting-Tools-OTEC>.

[32] ŠVARC, V.: *Preparace břítu monolitních fréz pomocí vlečného omílání*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. ZČU v Plzni.

[33] *Dokonalý povrch obráběcích nástrojů*. In Machining and tooling magazine [online]. [s.l.] : [s.n.], 2009 [cit. 2011-10-24]. Dostupné z: <http://www.infocube.cz/images/machining-tooling/clanky/Dokonalý%20povrch%20obrabecich%20nastroju_56-57.pdf>.

[34] PRIARONE, P.C., RIZZUTI, S., SETTINERI, L., VERGNANO, G.: *Effects of cutting angle, edge preparation, and nano-structured coating on milling performance of a gamma titanium aluminide*. Journal of Materials Processing Technology. 2012, vol. 212, issue 12, s. 2619-2628 [cit. 2015-01-28]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.07.021. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013612002373>.

[35] BOUZAKIS, K.-D., BOUZAKIS, E., SKORDARIS, G., MAKRIMALLAKIS, S., TSOUKNIDAS, A., KATIRTZOGLU, G., GERARDIS, S.: *Effect of PVD films wet micro-blasting by various Al₂O₃ grain sizes on the wear behaviour of coated tools*. Surface and Coatings Technology. 2011, vol. 205, S128-S132 [cit. 2014-11-13]. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.03.046. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0257897211002350> : autor neznámý.

[36] BOUZAKIS, K.-D., MICHAELIDIS, N., SKORDARIS, G., BOUZAKIS, E., BIERMANN, D., M'SAOUBI, R.: *Cutting with coated tools: Coating technologies, characterization methods and performance optimization*. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2012, vol. 61, issue 2, s. 703-723 [cit. 2015-01-28]. DOI: 10.1016/j.cirp.2012.05.006. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850612002053>.

[37] BOUZAKIS, K.-D., GERARDIS, S., SKORDARIS, G., KATIRTZOGLU, G., MAKRIMALLAKIS, S., KLOCKE, F., BOUZAKIS, E.: *Effect of dry micro-blasting on PVD-film properties, cutting edge geometry and tool life in milling*. Surface and Coatings Technology. 2009, vol. 204, 6-7, s. 1081-1086 [cit. 2014-11-13]. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.07.018. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0257897209005854>.

[38] BUECHEL, C., et al.: *Influence of Edge Preparation on the Performance of Coated Cutting Tools*. In International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films. [s.l.] : [s.n.], 2007 [cit. 2011-10-26]. Dostupné z WWW: <http://www.platit.com/files/Edge_Preparation_San_Diego_2007.pdf?phpMyAdmin=a119463be3ae6bac8bca5daf85c91449>. : autor neznámý.

[39] KONRAD, W., CLAUS, D., MARCEL, H., CHRISTIAN, W.: *Laser Prepared Cutting Tools*. Physics Procedia. 2012, vol. 39, s. 240-248 [cit. 2015-01-28]. DOI: 10.1016/j.phpro.2012.10.035. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S187538921202562X>.

[40] AURICH, J. C., ZIMMERMANN, M., LEITZ, L.: *The preparation of cutting edges using a marking laser*. Production Engineering. 2011, vol. 5, issue 1, s. 17-24 [cit. 2014-11-13]. DOI: 10.1007/s11740-010-0275-9. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11740-010-0275-9>.

[41] KARPUSCHEWSKI, B., BYELYAYEV, O., MAIBORODA, V.S.: *Magneto-abrasive machining for the mechanical preparation of high-speed steel twist drills*. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2009, vol. 58, issue 1, s. 295-298 [cit. 2015-01-28]. DOI: 10.1016/j.cirp.2009.03.046. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S000785060900095X>.

[42] GOGAEV, K. A., NEPOMNYASHCHII, V. V., MOSINA, T. V., NESHPOR, I. P., LEONOWICZ, M.: *Special features of the magnetic abrasive machining*. Refractories and Industrial

Ceramics. 2006, vol. 47, issue 1, s. 46-47 [cit. 2015-01-28]. DOI: 10.1007/s11148-006-0052-7. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11148-006-0052-7>.

[43] CHEUNG, F.Y., ZHOU, Z.F., GEDDAM, A., LI, K.Y.: *Cutting edge preparation using magnetic polishing and its influence on the performance of high-speed steel drills*. Journal of Materials Processing Technology. 2008, vol. 208, 1-3, s. 196-204 [cit. 2015-01-28]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.12.108. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013608000344>.

[44] TÖNSHOFF, H.K., FRIEMUTH, T.: *Effects of grinding on the performance of cutting tools*. Production Engineering 1999;6:9–12.

[45] WEINERT, K., SCHNEIDER, M., WILLSCH, C.: *Influence of grinding on the quality of the cutting edge*. Production Engineering 1996;3:49–52.

[46] WEINERT, K., SCHNEIDER, M.: *Simulation of tool-grinding with finite element method*. CIRP Annals 2000;49:253–6.

[47] RECH, J., YEN, Y.-C., SCHAFF, M.J., HAMDI, H., ALTAN, T., BOUZAKIS, K.D.: *Influence of cutting edge radius on the wear resistance of PM-HSS milling inserts*. Wear. 2005, vol. 259, 7-12, s. 1168-1176 [cit. 2015-01-28]. DOI: 10.1016/j.wear.2005.02.072. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164805001985>.

[48] BIERMANN, D., TERWEY, I.: *Cutting edge preparation to improve drilling tools for HPC processes*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2008, vol. 1, issue 2, s. 76-80 [cit. 2015-03-10]. DOI: 10.1016/j.cirpj.2008.09.002. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1755581708000345>.

[49] JANDA, Z.: *Studie problematiky frézování feriticko-martenzitické oceli P91*. Plzeň, 2012. Disertační práce. ZČU v Plzni.

[50] *Katalog společnosti Ingersoll, Cutting tools*

[51] *Material. No.: 1.4903. Woite - edelstahle* [online]. 2012 [cit. 2015-06-24]. Dostupné z: <http://www.woite-edelstahl.com/14903en.html>.

[52] HAGEN, I., BENDICK, W.: *Creep resistant ferritic steels for power plants*. Baidu [online]. 2002, [cit. 2015-06-02]. Dostupné z: <http://wenku.baidu.com/view/ea42dd03a6c30c2259019e67.html>.

[53] *Analyzing and commanding sophisticated machining processes. Cutting force measurement*. 2013 [cit. 2015-08-15]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/fileadmin/files/divisions/sensor-technology/cutting-force/960-001e-05.14.pdf>.

[54] *Drsnost povrchů a rychlé děje v objektivu vysokorychlostního kamerového systému*. Uherský Brod, 2012, 2012 [cit. 2015-08-11]. Dostupné z: <http://int.spsoa-ub.cz/ccv/projekty/vzdelavanipedagogu/dokumenty/skripta/kurz11.pdf>.

[55] WALDORF, D. J., DEVOR, R. E., KAPOOR, S. G.: *An Evaluation of Ploughing Models for Orthogonal Machining*. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 1999, vol. 121, issue 4, s. 550- [cit. 2015-01-28]. DOI: 10.1115/1.2833050. Dostupné z: <http://ManufacturingScience.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1434831>.

[56] ARAMCHAROEN, A., MATIVENGA, P.T.: *Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel*. Precision Engineering. 2009, vol. 33, issue 4, s. 402-407 [cit. 2015-01-28]. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2008.11.002. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141635908001529>.

[57] FANG, N., FANG, G.: *Theoretical and experimental investigations of finish machining with a rounded edge tool*. Journal of Materials Processing Technology. 2007, vol. 191, 1-3, s. 331-334 [cit. 2015-01-28]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.03.060. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013607002336>.

[58] BASURAY, P.K., MISRA, B.K., LAL, G.K.: *Transition from ploughing to cutting during machining with blunt tools*. Wear . 1977, 43(3), 341-349 [cit. 2016-02-03]. DOI: 10.1016/0043-1648(77)90130-2. ISSN 00431648. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0043164877901302>.

[59] ŘEHOŘ, J.: *Teoretické a experimentální studium problematiky HSC obrábění ocelí vysoké pevnosti a tvrdosti*. Plzeň, 2004. Disertační práce. ZČU v Plzni

[60] ČERMÁK, A.: *Možnosti úpravy břitu řezného nástroje pomocí LASERU*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. ZČU v Plzni.

[61] HUMÁR, A.: *Technologie I. Technologie obrábění - 1. část*. Vysoké Učení Technické v Brně, 2003. [cit. 2016-03-14]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf

[62] MOSER, M.: *The importance of cutting edge preparation: Edge rounding and polishing of carbide tools*. In: Edeltec. [cit. 2016-03-14]. Dostupné z: <http://edeltec.com/wp-content/uploads/2015/12/OTEC-The-Importance-of-Cutting-Edge-Preparation-2-12-2.pdf>.

[63] *ProIMC*. online, [cit. 2011-06-24]. Technické přednášky ISCAR, Řezné materiály. Dostupné z WWW: <www.proimc.cz/userFiles/Rezmater.ppt>.

[64] SAHA, P.K.: *Comparing materials for high-temperature*. The Fabricator [online]. 2003 [cit. 2011-05-31]. Tube and Pipe Fabrication Article. Dostupné z WWW: <<http://www.thefabricator.com/article/tubepipefabrication/comparing-materials-for-high-temperature-steam-piping>>.

[65] MARTINEC, J., PLÍHAL, A.: *Svařovací materiály vhodné pro svařování materiálů pracujících za zvýšených teplot*. Svět svaru [online]. 2009 [cit. 2011-05-31]. Dostupné z WWW: <www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/Zvyšené_teploty_2008.pdf>.

[66] SVOBODOVÁ, M., DOUDA, J., ČMAKAL, J., SOPOUŠEK, J., DUBSKÝ, J.: *Homogenní a heterogenní svarové spoje žárovevných ocelí*. Metal 2009. 2009, [cit. 2015-06-02]. Dostupné z: <http://konference.tanger.cz/data/metal2009/sbornik/Lists/Papers/039.pdf>.

[67] HAKL, J., VLASÁK, T., KUDRMAN, J.: *Creepové vlastnosti a struktura oceli P91*. In: Metal 2008. 2008 [cit. 2015-06-02]. Dostupné z: http://konsyst.tanger.cz/files/proceedings/metal_08/Lists/Papers/134.pdf.

[68] CORWIN, W. R.: *U.S. generation IV reactor integrated materials technology program*. In: KNS. 2006 [cit. 2015-06-02]. Dostupné z: <http://www.kns.org/jknsfile/v38/JK0380591.pdf>.

[69] ARIVAZHAGAN, B., SUNDARESAN, S., KAMARAJ, M.: *A study on influence of shielding gas composition on toughness of flux-cored arc weld of modified 9Cr-1Mo (P91) steel*. Journal of Materials Processing Technology. 2009, 209(12-13): 5245-5253 [cit. 2015-06-02]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.02.006. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013609000624>.

[70] *Systém měření drsnosti - parametry drsnosti*. Hommel - etamic [online]. Teplice, 2012 [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: https://www.hommel-etamic.cz/files/094_14-hommel-plakat-drsnost-1000x700mm.pdf

[71] ŘEHOŘ, J.: *Teorie obrábění*. Podklady pro přednášku předmětu KTO/TO. Plzeň. Západočeská univerzita, Katedra Technologie Obrábění

[72] MUŽÍK, J.: *Vliv typu VBD na kvalitu obrobeneho povrchu při frézování*. Plzeň. 2010. Bakalářská práce. ZČU v Plzni

[73] WONNACOTT, T. H., WONNACOT, A., RONALD, J.: *Statistika pro obchod a hospodářství*. Praha : Victoria Publishing, 1993. -- 891 s. : il.. -- ISBN 80-85605-09-0.

9. SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

OBR. 2 - 1: CHARAKTERISTIKA ŘEZNÉHO BŘITU	12
OBR. 2 - 2: EFEKTIVNÍ ÚHEL ČELA.....	13
OBR. 2 - 3: ZÁKLADNÍ ÚPRAVY ŘEZNÉHO OSTŘÍ A JEJICH VARIANTY.....	14
OBR. 2 - 4: CHARAKTERISTIKA ÚPRAVY OSTŘÍ	15
OBR. 2 - 5: VÝROBNÍ PROCES NÁSTROJŮ VYROBENÝCH PRÁŠKOVOU METALURGIÍ.....	16
OBR. 3 - 1: A) ILUSTRATIVNÍ OBRÁZEK KARTÁČOVÁNÍ; B) DETAIL KARTÁČE	17
OBR. 3 - 2: JEDNOTLIVÉ STAVY OPOTŘEBENÍ VLÁKEN KARTÁČE	18
OBR. 3 - 3: KINEMATIKA EDM ÚPRAVY OSTŘÍ	19
OBR. 3 - 4: STROJ PRO VLEČNÉ OMÍLÁNÍ – OTEC	20
OBR. 3 - 5: VLIV PROCESNÍCH PARAMETRŮ NA \bar{S} NEBO S_q PŘI MOKRÉM TRYSKÁNÍ	21
OBR. 3 - 6: A) PRINCIP MOKRÉHO TRYSKÁNÍ ; B) ÚČINEK VELIKOSTI ABRAZIVNÍCH ZRN NA DRSNOST POVRCHU DEPONOVANÉHO NÁSTROJE PŘI MOKRÉM TRYSKÁNÍ	22
OBR. 3 - 7: POVRCH NÁSTROJE VYTVOŘENÝ LASEROVÝM PAPSKEM.....	23
OBR. 3 - 8: VSTUPNÍ PARAMETRY PRO LASEROVÝ SYSTÉM	24
OBR. 3 - 9: MAGNETO-ABRAZIVNÍ STROJ PRO VÝZKUMNÉ ÚČELY	25
OBR. 4 - 1: MAPA DOSAŽENÝCH TRVANLIVOSTÍ	28
OBR. 4 - 2: VLIV K NA TRVANLIVOST PŘI NEPŘERUŠOVANÉM A PŘERUŠOVANÉM ŘEZU	29
OBR. 4 - 3: TRVANLIVOST ŘEZNÉHO BŘITU DOSAŽENÁ S RŮZNÝMI ÚPRAVAMI OSTŘÍ	29
OBR. 4 - 4: TRVANLIVOST ŘEZNÉHO BŘITU A DRSNOST OBROBENÉHO POVRCHU NÁSTROJEM S LASEROVĚ UPRAVENÝM OSTŘÍM	30
OBR. 4 - 5: MAPA TRVANLIVOSTI PRO MATERIÁL OBROBKU 42CrMo4	30
OBR. 4 - 6: VLIV MIKRO-GEOMETRIE BŘITU NA ŘEZNÉ SÍLY (v_c = PROMĚNNÁ, $f_{ot} = 0,1\text{mm}$, $\gamma_o = -6^\circ$)	31
OBR. 4 - 7: MAPA TRVANLIVOSTI PRO ORTOGONÁLNÍ SOUSTRUŽENÍ OCELI AISI1045 ($v_c = 300\text{ m/min}$; $f_{ot} = 0,1\text{ mm}$)	31
OBR. 4 - 8: VLIV ÚHLU ČELA A ÚPRAVY OSTŘÍ NA TRVANLIVOST A DRSNOST OBROBENÉHO POVRCHU	32
OBR. 4 - 9: POSUVOVÁ SÍLA, OPOTŘEBENÍ NA HŘBETĚ A DRSNOST OBROBENÉHO POVRCHU PŘI HLUBOKÉM VRTÁNÍ UPRAVENÝMI NÁSTROJI	33
OBR. 4 - 10: ŘEZNÁ A POSUVOVÁ SÍLA PŘI SOUSTRUŽENÍ OCELI Ti-6Al-4V S RŮZNÝMI POLOMĚRY ZAOBLENÍ.....	34
OBR. 4 - 11: ÚPRAVY OSTŘÍ NA ŠROUBOVITÉM VRTÁKU VERSUS DOSAŽENÉ VÝSLEDKY	34
OBR. 4 - 12: SCHEMATICKÁ ILUSTRACE PROFILU ZAOBLENÉHO OSTŘÍ.....	35
OBR. 5 - 1: SCHÉMA POSTUPU ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE	38
OBR. 5 - 2: DOKONČOVACÍ FRÉZOVACÍ HLAVA 6F2B A GEOMETRIE DESTIČKY YDA323L101	40
OBR. 5 - 3: ROVINY NÁSTROJOVÉ SOUŘADNICOVÉ SOUSTAVY	40
OBR. 5 - 4: SCHÉMA ZABĚROVÝCH PODMÍNEK	41
OBR. 5 - 5: NASTAVENÍ EXPERIMENTU	42
OBR. 6 - 1: ŘEZNÝ BŘIT A HODNOTA r_n MĚŘENÁ NA IFM G4	44
OBR. 6 - 2: BŘIT VBD IN04S 500X A 2000X ZVĚTŠENÉ – ELEKTRONOVÝ MIKROSKOP	44
OBR. 6 - 3: ROZKLAD ŘEZNÝCH SIL NA ŘEZNÉM BŘITU - $\Phi_{max} = 104^\circ$ A UMÍSTĚNÍ OBROBKU NA DYNAMOMETRU	45
OBR. 6 - 4: ROZKLAD ŘEZNÝCH SIL NA ŘEZNÉM BŘITU - $\Phi_1 = 90^\circ$	46
OBR. 6 - 5: ZÁZNAM PRŮBĚHU JEDNOTLIVÝCH SLOŽEK ŘEZNÝCH SIL ORIGINÁLNÍ VBD PRO $v_c = 230\text{ m/min}$	47
OBR. 6 - 6: VLIV ŘEZNÉ RYCHLOSTI A OBJEMU ODEBRANÉHO MATERIÁLU NA CELKOVÉ SILOVÉ ZATÍŽENÍ	48
OBR. 6 - 7: VLIV ŘEZNÉ RYCHLOSTI A OBJEMU ODEBRANÉHO MATERIÁLU NA F_c PRO ORIGINÁLNÍ IN04S	49
OBR. 6 - 8: VLIV ŘEZNÉ RYCHLOSTI NA VELIKOST JEDNOTLIVÝCH SLOŽEK ŘEZNÉ SÍLY A CELKOVÉ SILOVÉ ZATÍŽENÍ PŘI OBJEMU ODEBRANÉHO MATERIÁLU 48 cm^3	50
OBR. 6 - 9: VLIV ŘEZNÉ RYCHLOSTI NA OPOTŘEBENÍ ŘEZNÉHO BŘITU NÁSTROJE IN04S.....	51
OBR. 6 - 10: OPOTŘEBENÍ VYMĚNITELNÝCH BŘITOVÝCH DESTIČEK PŘI PROMĚNNÝCH v_c	51
OBR. 6 - 11: NÁMĚRNÁ MÍSTA NA OBROBENÉ PLOŠE PRO VYHODNOCOVANOU DRSNOST Ra A Rz	52
OBR. 6 - 12: VLIV ŘEZNÉ RYCHLOSTI NA DRSNOST OBROBENÉHO POVRCHU	54
OBR. 6 - 13: TVAR VZNIKAJÍCÍCH TRÍSEK PŘI $v_c = 230\text{ m/min}$ PO 1) 6 cm^3 ; 2) 30 cm^3 A 3) 48 cm^3	55

OBR. 6 - 14: SCHÉMA VZNIKU TŘÍSEK O ŠÍŘCE 9 mm	55
OBR. 6 - 15: TVAR VZNIKAJÍCÍCH TŘÍSEK PŘI $v_c = 200$ m/min PO 1) 6 cm^3 ; 2) 30 cm^3 A 3) 60 cm^3	55
OBR. 6 - 16: ZJEDNODUŠENÉ SCHÉMA ŘEZNÉHO BŘITU V ZÁBĚRU S VYZNAČENÍM BODU S	57
OBR. 6 - 17: OBRÁBĚNÍ V A) MAKRO-MĚŘÍTKU A B) MIKRO-MĚŘÍTKU	58
OBR. 6 - 18: VLIV ASYMETRICKY UPRAVENÉHO ŘEZNÉHO BŘITU NA SEPARAČNÍ BOD S	59
OBR. 6 - 19: OSTŘÍ NÁSTROJE S $r_n = 10\ \mu\text{m}$ 500X A 2000X ZVĚTŠENÉ – ELEKTRONOVÝ MIKROSKOP	60
OBR. 6 - 20: OSTŘÍ NÁSTROJE S $r_n = 15\ \mu\text{m}$ 500X A 2000X ZVĚTŠENÉ – ELEKTRONOVÝ MIKROSKOP	60
OBR. 6 - 21: OSTŘÍ NÁSTROJE S $r_n = 20\ \mu\text{m}$ 500X A 2000X ZVĚTŠENÉ – ELEKTRONOVÝ MIKROSKOP	61
OBR. 6 - 22: VELIKOST RN VS. SKUTEČNÁ TLOUŠŤKA ODŘEZÁVANÉ VRSTVY	62
OBR. 6 - 23: VLIV r_n A V NA F_c	63
OBR. 6 - 24: MECHANIZMUS VZNIKU TŘÍSKY - NEOPOTŘEBENÝ BŘIT	63
OBR. 6 - 25: MECHANIZMUS TVORBY TŘÍSKY - OPOTŘEBENÝ BŘIT (VZNIK PLOŠKY NA OSTŘÍ S NEGATIVNÍM EFEKTIVNÍM ÚHLEM ČELA - γ_i)	64
OBR. 6 - 26: VLIV r_n A V NA F_p	66
OBR. 6 - 27: KRITÉRIA OPOTŘEBENÍ ŘEZNÉHO BŘITU	67
OBR. 6 - 28: VLIV VELIKOSTI r_n OSTŘÍ NA OPOTŘEBENÍ ŘEZNÉHO BŘITU PŘI KONSTANTNÍCH ŘEZNÝCH PODMÍNKÁCH	67
OBR. 6 - 29: OPOTŘEBENÍ VYMĚNITELNÝCH BŘITOVÝCH DESTIČEK PŘI PROMĚNNÉM r_n	68
OBR. 6 - 30: VLIV POLOMĚRU ZAOBLENÍ OSTŘÍ NA DRSNOST OBROBENÉHO POVRCHU	69
OBR. 6 - 31: TVAR VZNIKAJÍCÍCH TŘÍSEK PO $V = 60\text{cm}^3$ PRO: A) $r_n = 10\ \mu\text{m}$; B) $r_n = 15\ \mu\text{m}$; C) $r_n = 20\ \mu\text{m}$	70
OBR. 6 - 32: VLIV V A r_n NA m_c	70
OBR. 6 - 33: OSTŘÍ UPRAVENÉ VLEČNÝM OMÍLÁNÍM NA $K = 0,4$; 500X A 2000X ZVĚTŠENÉ	73
OBR. 6 - 34: OSTŘÍ UPRAVENÉ VLEČNÝM OMÍLÁNÍM NA $K = 0,6$; 500X A 2000X ZVĚTŠENÉ	73
OBR. 6 - 35: OSTŘÍ UPRAVENÉ VLEČNÝM OMÍLÁNÍM NA $K = 1,6$; 500X A 2000X ZVĚTŠENÉ	74
OBR. 6 - 36: OSTŘÍ UPRAVENÉ VLEČNÝM OMÍLÁNÍM NA $K = 2$; 500X A 2000X ZVĚTŠENÉ	74
OBR. 6 - 37: ZÁBĚROVÉ PODMÍNKY BŘITŮ S $K < 1$ A $K > 1$	75
OBR. 6 - 38: VLIV VELIKOSTI K NA m_c A t_{x1} PŘI $V = 0,6\text{ cm}^3$	75
OBR. 6 - 39: VLIV V A K NA F_c	76
OBR. 6 - 40: VLIV V A K NA F_p	76
OBR. 6 - 41: VLIV FAKTORU SYMETRIČNOSTI A OBJEMU ODEBRANÉHO MATERIÁLU NA DRSNOST OBROBENÉHO POVRCHU	78
OBR. 6 - 42: VLIV r_n , K A V NA RA PŘI $l_t = 17,5\text{mm}$	79
OBR. 6 - 43: VLIV FAKTORU SYMETRIČNOSTI OSTŘÍ A OBJEMU ODEBRANÉHO MATERIÁLU NA VELIKOST OPOTŘEBENÍ NA HŘBETĚ A ČELE ŘEZNÉHO NÁSTROJE	79
TAB. 3 - 1: PROCESNÍ MÉDIA	20
TAB. 3 - 2: POROVNÁNÍ MOKRÉHO A SUCHÉHO TRYSKÁNÍ	22
TAB. 3 - 3: PROCESNÍ MÉDIA PRO MAGNETICKÉ LEŠTĚNÍ	26
TAB. 3 - 4: RELATIVNÍ POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH METOD ÚPRAVY OSTŘÍ S OHLEDEM NA JEJICH CHARAKTERISTICKÉ RYSY	27
TAB. 5-1: CHEMICKÉ SLOŽENÍ OCELI P91	41
TAB. 6 - 1: ŘEZNÉ PODMÍNKY PRO FRÉZOVÁNÍ NÁSTROJEM IN04S	43
TAB. 6 - 2: PARAMETRY BŘITU IN04S	43
TAB. 6 - 3: NAMĚŘENÁ RA V JEDNOTLIVÝCH MÍSTECH NÁMĚRU PŘI $v_c = 200$ m/min A $V = 6\text{ cm}^3$	53
TAB. 6 - 4: ANOVA DAT RA PŘI 200 m/min	53
TAB. 6 - 5: POROVNÁNÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ NA ZÁKLADĚ KRITÉRIÁLNÍCH PODMÍNEK	56
TAB. 6 - 6: PARAMETRY BŘITU S $r_n = 10\ \mu\text{m}$	60
TAB. 6 - 7: PARAMETRY BŘITU S $r_n = 15\ \mu\text{m}$	60
TAB. 6 - 8: PARAMETRY BŘITU S $r_n = 20\ \mu\text{m}$	61
TAB. 6 - 9: PARAMETRY TEORETICKÉ TLOUŠŤKY ODŘEZÁVANÉ VRSTVY	62
TAB. 6 - 10: POROVNÁNÍ F_c NA ZÁKLADĚ SKUTEČNÉ TLOUŠŤKY ODŘEZÁVANÉ VRSTVY:	65
TAB. 6 - 11: PARAMETRY OSTŘÍ PRO $K = 0,4$	73

TAB. 6 - 12: PARAMETRY OSTŘÍ PRO $K = 0,6$	73
TAB. 6 - 13: PARAMETRY OSTŘÍ PRO $K = 1,6$	74
TAB. 6 - 14: PARAMETRY OSTŘÍ PRO $K = 2$	74
TAB. 6 - 15: PARAMETRY OSTŘÍ UPRAVENÉ RŮZNÝMI TECHNOLOGIEMI.....	81

PŘÍLOHY

k disertační práci

**Studie problematiky zvyšování řezivosti nástroje při frézování
feriticko-martenzitické oceli P91**

OBSAH

P1.	EXPERIMENTÁLNÍ VYBAVENÍ.....	3
P1.1	CHARAKTERISTIKA OBRÁBĚCÍHO STROJE MCV 750 A	3
P2.1	DRSNOMĚR MARSURF M300	4
P3.1	DRSNOMĚR MITUTOYO SURFTEST SJ - 210	4
P4.1	MIKROSKOP MULTICHECK PC 500.....	5
P5.1	SOUSTAVA PRO MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ SILOVÉHO ZATÍŽENÍ.....	6
	P5.1.1 Dynamometr KISTLER	6
	P5.1.2 Zesilovač	6
	P5.1.3 Sběrná karta	6
	P5.1.4 Software pro záznam a zpracování dat	7
P6.1	LABORATORNÍ VÁHY RADWAG AS 220/C/2	7
P2.	NÁSTROJOVÉ VYBAVENÍ	8
P2.1	SPECIFIKACE ŘEZNÉHO MATERIÁLU IN2004 – IN04S.....	8
P3.	OBRÁBĚNÝ MATERIÁL.....	10
P3.1	OCEL P91.....	10
P3.2	MIKROSTRUKTURA OCELI	11
P3.3	CHEMICKÉ SLOŽENÍ	12
P3.4	VÝROBA A TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ	12
P4.	WIPER GEOMETRIE NÁSTROJE	13
P5.	NORMA MĚŘENÍ DRSNOSTI	15
P6.	ANALÝZA ROZPTYLU HODNOT DRSNOSTI PRO PROMĚNNÉ v_c.....	16
P7.	M-S ANALÝZA JEDNOTLIVÝCH SLOŽEK ŘEZNÝCH SIL PRO PROMĚNNÉ v_c.....	19
P8.	M-S ANALÝZA JEDNOTLIVÝCH SLOŽEK ŘEZNÝCH SIL PRO PROMĚNNÉ r_n.....	26
P9.	ANALÝZA ROZPTYLU HODNOT DRSNOSTI R_a PRO PROMĚNNÉ r_n.....	31
P10.	KŘIVKY PROFILU POVRCHU A NOSNÁ KŘIVKA PROFILU (ABBOTTOVA NOSNÁ KŘIVKA) PRO PROMĚNNÉ r_n	34
P11.	SKUTEČNÝ TVAR OSTŘÍ NÁSTROJE S PROMĚNNÝM K.....	37
P12.	ANALÝZA ROZPTYLU HODNOT DRSNOSTI R_a PRO PROMĚNNÉ K.....	38

P1. EXPERIMENTÁLNÍ VYBAVENÍ

P1.1 CHARAKTERISTIKA OBRÁBĚCÍHO STROJE MCV 750 A

Základní technické údaje o stroji:

Druh	vertikální obráběcí centrum
Typ	MCV 750 A
Počet CNC řízených os	3
Jmenovitý výkon vřetena	16 kW
Rozsah otáček vřetena	20 – 13000 min ⁻¹
Změna otáček	plynulá
Zdvih v ose X, Y, Z	750, 500, 500 mm
Rozměry upínacího stolu	1000x500 mm
Pracovní posuvy X, Y, Z	1-15000 mm.min ⁻¹
Rychloposuvy X, Y, Z	25 m.min ⁻¹
Řídicí systém	Heidenhein TNC 426



Obr. P 1: Vertikální obráběcí centrum MCV 750A (ilustrační obrázek)

P2.1 DRSNOMĚR MARSURF M300

Technické parametry:

Měřicí rozsah:	do 350 μm	
Citlivost:	0,001 μm	
Normy:	ISO, ASME, JIS a MOTIF (volitelně)	
Vyhodnocované veličiny:	DIN/ISO:	Ra, Rq, Rz, Rmax, Rp, Rpk, Rk, Rvk, Rv, Mr1, Mr2, A1, A2, Vo, Rt, R3z, R _{Pc} , R _{mr} , R _{Sm}
	JIS:	Ra, Rz, RzJIS, Sm, S, tp
	ASME:	Rp, Rpm
	MOTIF:	R, Ar, Rx, W, CR, CL, Rz, Rmax, R3z, Rt ... 0 - 200 μm
Délka měřicí dráhy dle DIN EN ISO 4288 [mm]	1,75; 5,6; 17,5	
Délka měřicí dráhy dle DIN EN ISO 12085[mm]	1; 2; 4; 8; 12; 16	
Počet měřitelných drah:	1 - 5 (volitelně)	

K vyhodnocení získaných náměrů byl použit software MarSurf PS1/M300 Explorer.



Obr. P 2: Drsnoměr Marsurf M300

P3.1 DRSNOMĚR MITUTOYO SURFTEST SJ - 210

Technické parametry:

Posuvová jednotka	Rozsah měření	16 mm
	Příčný směr [mm]	17,5
	Rychlost měření [mm/s]	0,25; 0,5; 0,75
Snímač	Snímací metoda	Diferenciální indukčnost
	Rozsah měření	360 μm
	Snímací dotek	Diamantový hrot
	Poloměry patky měření	40 mm
Vyhodnocovací jednotka	Profily	Profil drsnosti (R), R-Motif, DF-Profil a další
	Etalon drsností	EN ISO, VDA, JIS, ANSI a vlastní nastavení
	Digitální filtr	Gauss, 2CR75, PC75
	Délka cut-off	λ_c : 0,08 mm; 0,25 mm; 0,8 mm; 2,5 mm λ_s : 2,5 μm ; 8 μm
	Vyhodnocení tolerance	Barevné horní / dolní meze



Obr. P 3: Drsnoměr Mitutoyo Surftest SJ-210

P4.1 MIKROSKOP MULTICHECK PC 500

Technické parametry:

Upínané nástroje	rotační i nerotační nástroje
Typ provedení	horizontální
Rozsah osy x a y	0 - 150 mm
Možnost natáčení nástroje vůči objektivu	0° - 90°
Zvětšení	10x, 30x, 75x, 90x, 120x a 150x
Přesnost měření	5 μm
Další příslušenství	přípravek pro upínání rotačních nástrojů; přípravek pro měření rotačních i nerotačních nástrojů; prizmatický přípravek pro měření VBD



Obr. P 4: Dílenský mikroskop MULTICHECK P500

P5.1 SOUSTAVA PRO MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ SILOVÉHO ZATÍŽENÍ

Na obr. P5 je zobrazena zjednodušená soustava pro měření velikosti jednotlivých složek řezných sil. Skládá se z:

- dynamometru,
- zesilovače,
- sběrné karty,
- počítače se softwarem.



Obr. P 5: Soustava pro měření řezných sil

P5.1.1 Dynamometr KISTLER

Pro experimentální měření byl použit tří-složkový dynamometr od společnosti KISTLER s označením **9255A**.

Technické parametry

Měřící rozsah ve směru X [kN]	-20 až 20
Měřící rozsah ve směru Y [kN]	-20 až 20
Měřící rozsah ve směru Z [kN]	-10 až 40
Dovolená provozní teplota [°C]	0 až 70
Vlastní frekvence [kHz]	3
Chyba měření [%]	1%
Citlivost [pC/N]	8
Spojovací kabel se zesilovačem	1687A5

P5.1.2 Zesilovač

K přeměně elektrického náboje na napětí byl použit zesilovač **KISTLER 5007**.

Technické parametry

Měřící rozsah	10 až 500 000 pC (max. přeměněn na 10 V při 100 Ω)
Citlivost	0,1 až 11000 pC/N
Přesnost pro nejcitlivější rozsah	3%
Přesnost pro ostatní rozsahy	1%

P5.1.3 Sběrná karta

Typ použité sběrné karty - PCL 85511 fy ADVANTECH. Nejdůležitějším technickým parametrem je její vzorkovací frekvence. Ta je větší než 25 kHz.

P5.1.4 Software pro záznam a zpracování dat

Pro záznam dat byl použit specializovaný software Labview 6.1, jenž registruje velikost řezných sil v závislosti na čase [$F = f(t)$]. Naměřená data byla zpracována pomocí programu Nasomer 87, který byl vyvinut Ing. Janem Kutlwašerem na ZČU/FST v Plzni.

P6.1 LABORATORNÍ VÁHY RADWAG AS 220/C/2



Obr. P 6: Laboratorní váhy Radwag AS 220/C/2

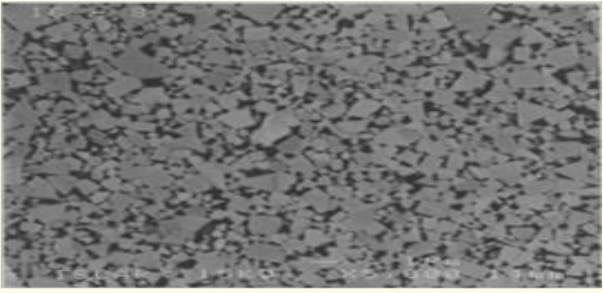
Technické parametry:

Maximální kapacita	220 g
Minimální zatížení	10 mg
Odečitelnost	0,1 mg
Rozsah táry	-220 g
Opakovatelnost	0,1 mg
Linearita	$\pm 0,2$ mg
Rozměr misky	$\varnothing 85$ mm
Čas stabilizace	3,5 s
Provozní teplota	$+10^{\circ} \div 40^{\circ} \text{C}$
Citlivost kolísání	1 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ při teplotě $+15^{\circ} \div 35^{\circ} \text{C}$
Kalibrace	interní (automatická)

P2. NÁSTROJOVÉ VYBAVENÍ

P2.1 SPECIFIKACE ŘEZNÉHO MATERIÁLU IN2004 – IN04S

Tab. P 1: Specifikace řezného materiálu IN2004 [63]

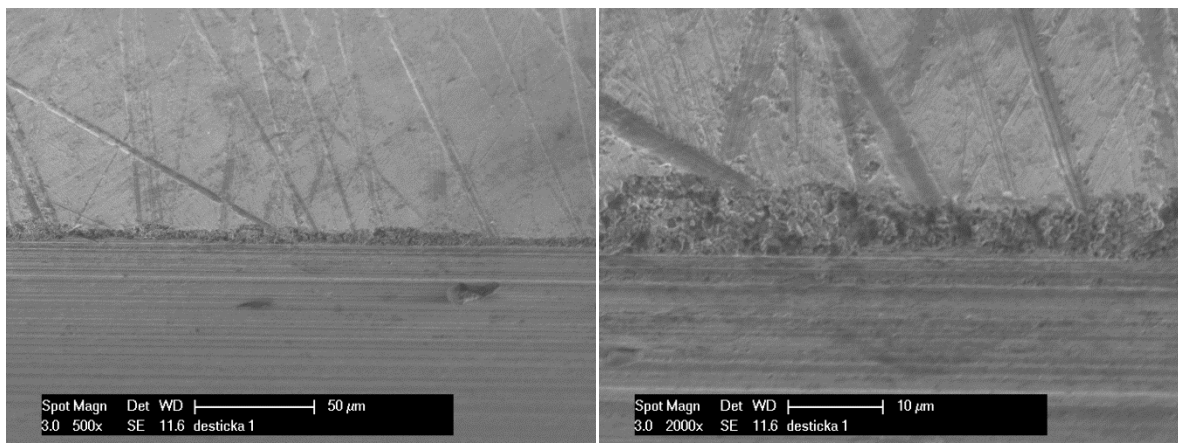
Označení:	IN2004
Metalografický výbrus:	
Vrstva:	TiAlN
Struktura:	Struktura zrna menší než 1 μm (označován jako sub-mikronový)
Vlastnosti:	Houževnatá sorta SK, určená pro obrábění nižšími až středními řeznými rychlostmi. Vykazuje vysokou pevnost při obrábění přerušovanými řezy. Má vysokou vrubovou pevnost a odolnost proti tvorbě nárůstků.
Použití:	Určen pro obrábění: vysokoteplotní slitiny, austenitické nerez oceli, tvrdých slitin a uhlíkových ocelí.
Úprava ostří:	Suché pískování

Tab. P 2: Specifikace vrstvy TiAlN [63]

Označení:	TiAlN
Tloušťka vrstvy:	2 ÷ 6 μm
Tvrdość HV:	33 GPa
Max. pracovní teplota:	900°C
Vlastnosti:	Vysoká tvrdość za tepla Vysoká oxidační odolnost Nízká tepelná vodivost Vysoká trvanlivost nástrojů při HSM Vysoká trvanlivost nástrojů při suchém obrábění

Na *obr. P7* je znázorněn detail ostří nástroje s vybroušenými funkčními plochami. Následně v *tabulce P3* jsou uvedeny měřené parametry ostří.

Dle chemického rozboru se jedná o karbid W = 85,6%, Co = 5,8% a C = 8,6%



Obr. P 7: Ostrí nástroje IN04S 500x a 2000x zvětšené – elektronový mikroskop

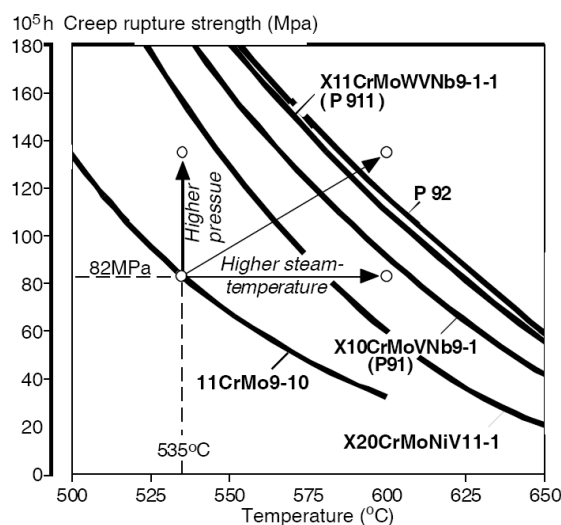
Tab. P 3: Parametry broušeného břitu IN04S

$r_n [\mu\text{m}]$	4,8 ÷ 6,2
$K [-]$	0,93 ÷ 1,09
$Rsa [\mu\text{m}]$	0,514 ÷ 0,594
$Rsz [\mu\text{m}]$	1,933 ÷ 2,266

P3. OBRÁBĚNÝ MATERIÁL

P3.1 OCEL P91

Materiál P91 byl poprvé představen v roce 1980 v USA (EN označení: X10CrMoVNbN9-1). Mezi hlavní přednosti tohoto materiálu patří jak vysoká pevnost při zvýšených teplotách, tak dobré výrobní vlastnosti. Tento materiál byl vytvořen proto, aby překlenul rozhraní mezi feritickými (P22) a austenickými oceli při zachování meze tečení za vysokých teplot. Ocel je určena pro výrobu výkovek, odlitků, plechů a trubek. V současné době je používána v elektrárnách po celém světě, a to jak v nových elektrárnách, tak i při renovaci stávajících elektráren. Litá forma této oceli je určena pro odlitky těles parních turbín pracujících v oblasti páry do teploty 550 – 650 °C. Ocel vznikla především za účelem zvyšování účinnosti tepelných elektráren při současné schopnosti snížit obsah CO₂ emisí. Toho lze dosáhnout zvyšováním parametrů páry, tj. teploty a tlaku páry, na vstupu do parních turbín ze současných 540 °C/18 MPa až na superkritických 650 °C/30 MPa. Tudíž se očekává, že u zařízení pracujících za podmínek teploty páry kolem 600°C a tlaku přes 26MPa stoupne účinnost o 8% a emise oxidu uhličitého poklesnou přibližně o 20%. Zvýšení účinnosti je otázka termodynamiky. Navýšení účinnosti může být dosaženo pouze s vhodným materiálem s odpovídající mezí tečení a schopností vydržet vysoké tlaky a teploty. *Obr. P 8* znázorňuje, jak navýšení parametrů páry souvisí s mezí tečení materiálu P91. [49], [52], [64], [65] a [69]



Obr. P 8: Požadavky na materiál se zvyšujícími se hodnotami tlaku a teploty [52]

Použití austenitických ocelí v této oblasti není moc vhodné, a to díky špatné tepelné vodivosti a velkému koeficientu tepelné roztažnosti. U tenkostěnných součástí, by měla být pozornost věnována skutečnosti, že teplota kovu bude o 30 °C vyšší než teplota páry. Výběr vhodného materiálu musí mít odpovídající mez tečení za zvýšených teplot kovu. Navíc ocel musí mít přiměřenou odolnost proti oxidaci.

Materiál P91 je feriticko-martenzitická žárovebná legovaná ocel s 9% Cr a 1% Mo. Je to ocel typu CrMoVNbN s poměrně nízkým obsahem uhlíku obvykle kolem 0,08 ÷ 0,12%C. Dle chemického složení vyplývá, že ocel má martenzitickou strukturu

v širokém rozsahu ochlazovacích rychlostí s tvrdostí max. 420 HV. V porovnání s ocelí CrMo přibyly silně karbidotvorné prvky V, Nb a N. Tyto prvky tvoří z C a N karbonitridy, které jsou jemně dispergované v celém objemu. Tyto karbonitridy jsou dlouhodobě velmi stálé i za maximálních provozních teplot oceli a jsou také hlavní zárukou udržení vysoké odolnosti proti creepu po celou dobu životnosti. Ocel P91 se používá zásadně v zušlechťeném stavu. Zušlechťování se sestává z rozpouštěcího žhání při 1 050 °C, ochlazování na vzduchu a následného popouštění při teplotě 780 °C. V tomto stavu má ocel optimální creepové vlastnosti pro práci za tepla, stejně tak i plastické vlastnosti při pokojové teplotě. V *tab. P4* jsou uvedeny mechanické vlastnosti oceli P91 vzhledem k teplotě prostředí. [65], [66] a [67]

Tab. P 4: Mechanické vlastnosti oceli P91[51] a [64]

Teplota oceli [°C]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A5 [%]	Kontrakce Z [%]
20	528	681	30	69
100	476	621	23	73
200	446	578	21	73
300	433	556	21	71
400	416	527	21	68
500	385	455	24	75
600	310	330	30	89
700	178	192	41	96

Nárazová práce při zkoušce vrubové houževnatosti je $KV = 41$ J. Požadovaná mez kluzu při teplotě 550 °C je $R_{p0,2min} = 270$ MPa.

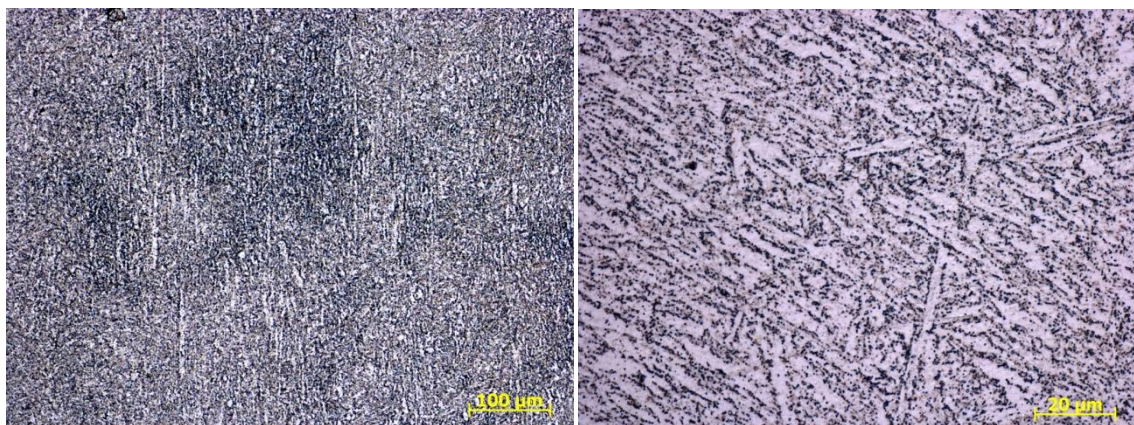
Jak již bylo uvedeno výše, jedná se tedy o modifikovanou feriticko-martenzitickou ocel mikrolegovanou vanadem, niobem a dále kontrolovaným obsahem dusíku (dalšími legujícími prvky jsou: Mo, W, Co, N a B).

Český ekvivalent této oceli nese označení ČSN 41 7119, tzn. žárovečná ocel na bázi 9% Cr, která vznikla modifikací starší varianty oceli ČSN 41 7116.

Označení dle německé normy W. - No. 1.4903.

P3.2 MIKROSTRUKTURA OCELI

Mikrostruktura odlitku je tvořena popuštěným martenzitem s delta feritem objemově maximálně do 1% (což má příznivý vliv na žárovečnost oceli). Přípustná střední velikost zrna je do 100 μ m. Mikrostruktura a precipitační reakce v této oceli jsou ovlivněny chemickým složením a parametry tepelného zpracování. Na *obr. P9* je znázorněna mikroskopická struktura vzorku oceli P91, struktura je homogenní. Z hlediska makroskopického jsou ve struktuře patrná tmavá místa, která mohou zásadně ovlivňovat vlastnosti materiálu a tím i řezný proces. [49], [63] a [68]



Obr. P 9: *Struktura materiálu P91; a) zvětšení 100x; b) zvětšení 500x*

P3.3 CHEMICKÉ SLOŽENÍ

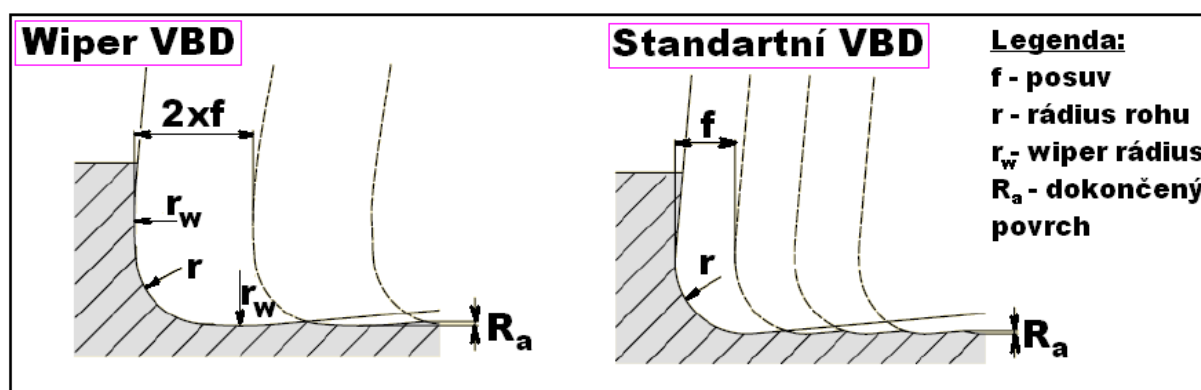
Ocel P91 je typu CrMoVNbN s nízkým obsahem uhlíku a její chemické složení je uvedeno v tab. 5-1, str. 41. Ocel má martenzitickou strukturu v širokém rozsahu ochlazovacích rychlostí s tvrdostí max. 260 HB. Tvoří přechod mezi nízkolegovanými CrMo nebo CrMoV ocelmi a austenitickými korozivzdornými ocelmi. Dále obsahuje silně karbidotvorné prvky V a Nb, které s C a N tvoří karbonitridy. Karbonitridy jsou jemně dispergované v celém objemu, jsou dlouhodobě velmi stálé i za maximálních provozních teplot a jsou hlavní zárukou udržení vysoké odolnosti proti creepu po celou dobu životnosti. [49], [51], [52] a [67]

P3.4 VÝROBA A TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

Ocel je odlévána ve vakuu při použití vakuové uhlíkové dezoxidace. Pro běžné podmínky provozu je používána v zušlechťeném stavu a po žíhání na odstranění vnitřního pnutí po každé opravě vad a hrubování. Vlastní zušlechťování se sestává z rozpouštěcího žíhání při 1050 °C, ochlazování na vzduchu a následném popouštění při žíhací teplotě odlitku min. 740 °C. Vysoký obsah chromu a přítomnost dalších legujících prvků vyvolává posun křivek rozpadu austenitu v ARA diagramech k dlouhým časům. Důsledkem je, že tyto oceli jsou plně prokalitelné i v tlustých průřezích při ochlazování na vzduchu. Z tohoto vyplývá, že v širokém rozmezí ochlazovacích rychlostí vzniká martenzit. Ten je převážně laťkový a uvnitř původních austenitických zrn vzniká několik svazků rovnoběžných martenzitických látek, které mohou být odděleny filmy zbytkového austenitu. [49], [51], [63] a [67]

P4. WIPER GEOMETRIE NÁSTROJE

Jedná se o speciální typ geometrie řezného nástroje určeného jak pro soustružnické, tak frézovací operace. Při použití standardních ISO VBD je výsledný stav obrobeneho povrchu závislý hlavně na poloměru zaoblení špičky nástroje, úhlu nastavení vedlejšího ostří a posuvu. Pro zlepšení kvality dokončovaného povrchu je nutné použít buď nižších posuvů nebo většího poloměru zaoblení špičky nástroje anebo využít nástroje s wiper geometrií. Na *obr. P10* je znázorněno, na jakém principu pracují vyměnitelné břitové destičky s wiper geometrií. Velký „wiper“ rádius ostří zajišťuje lepší jakost obrobeneho povrchu.

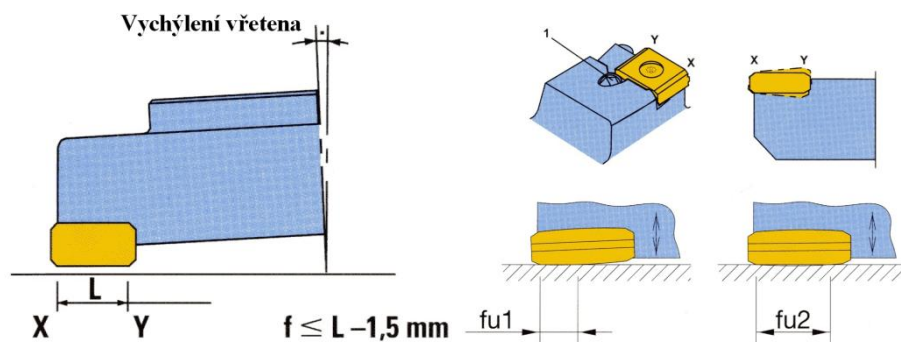


Obr. P 10: Porovnání standardních VBD a VBD s wiper geometrií [49]

Náhradou standardní VBD za VBD s wiper geometrií lze dosáhnout až dvojnásobně lepší drsnosti obrobeneho povrchu, a to za použití stejných hodnot posuvů. Proto reálný přínos tohoto nástroje je v navýšení hodnot posuvů, za současného snížení času na danou operaci obrábění, a to vše při dosažení té samé, případně nižší hodnoty drsnosti obrobeneho povrchu jako za použití standardních VBD.

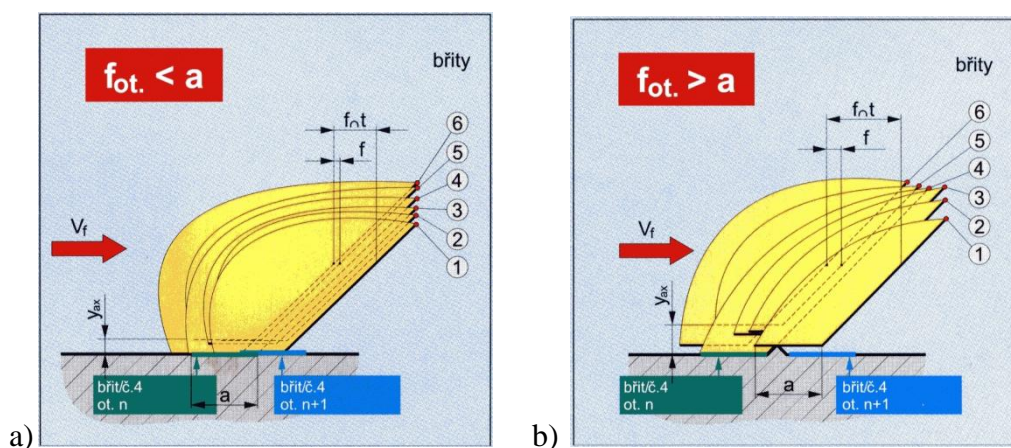
Přestože wiper geometrie zlepšuje jakost obrobeneho povrchu, má též určitá omezení. Není vhodná pro lehké dokončovací operace, protože vyžadují větší objem materiálu na řeznou hranu, tzn. větší hloubky řezu. Také musí být použity při vysokých posuvech tak, aby bylo dosaženo jejich výhod. Dále mohou být použity, jen pokud je statická a dynamická tuhost stroje vysoká, aby zabránila vibracím spojeným s použitím této geometrie. Také nastavení nástroje musí být velmi přesné, tak aby bylo dosaženo úhlu nastavení vedlejšího ostří $\chi_r' = 0$. Jestliže by bylo $\chi_r' > 0$, účinnost wiper geometrie se snižuje, a pokud $\chi_r' < 0$ tak dochází k nárůstu řezných sil, které mohou způsobit poškození řezného břitu. Wiper geometrie není vhodná pro obrábění těžko-obrobitelných materiálů mající významnou mez kluzu.

Na *Obr. P 11* je znázorněno využití destiček s wiper geometrií při dokončovacím frézování pro nástroje od společnosti Ingersoll. Maximální posuv na otáčku může být o 1,5 mm menší než délka ostří (L). Ingersoll též umožňuje nastavení vychýlení takovéto VBD dle požadovaného posuvu na otáčku. V závislosti na podmínkách použití, lze využít nastavení pomocí zašroubování stavěcího šroubu (1). Nastavení stavěcím šroubem může být provedeno pouze v případě, že destička není plně dotažena upínacím šroubem.



Obr. P 11: Wiper destičky v dokončovací fríze od společnosti Ingersoll [50]

Pokud je frézovací hlava osazena více VBD s wiper geometrií, tak výslednou obrobenu plochu tvoří více břitů, a proto mikro-geometrie obrobeneho povrchu závisí na axiální házivosti jednotlivých břitů frézy. Obrobeneý povrch vytváří nejvíce axiálně vysunutě břity, viz obr. P12. V případě, že posuv na otáčku je menší než šířka hladicího břitu ($f_{ot} < a$), uplatňuje se při vytváření mikro-geometrie obrobeneho povrchu hladicí břit s nejvíce axiálně vysunutou VBD a jakost obrobeneho povrchu je dobrá. [72]


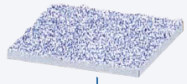


Obr. P 12: Vliv axiálního přesazení VBD na jakost obrobeneho povrchu [72]

P5. NORMA MĚŘENÍ DRSNOSTI [70]

Výběr cut-offu (filtru profilu) podle ISO 4288:1998 a ISO 3274:1998

Cut-off se vybírá podle vlnové rozteče nebo předpokládané hodnoty Ra. Tomu současně odpovídá vyhodnocovaná délka podle norem. Odchytky jsou povoleny v případě, že dílec nedovoluje nastavení podle norem.

Periodické profily např. soustružení, frézování	Měřicí podmínky Podle DIN EN ISO 4288:1998 a DIN EN ISO 3274:1998	Aperiodický povrch (broušení, vyjiskrování)																																										
 <p>Střední vzdálenost rýh elementů drsnosti</p>	<p>Mezní vlnová délka λ_c (lc)</p> <p>Základní délka l_r</p> <p>Měřená délka l_n</p> <p>Celková délka l_t</p> <p>Rádus hrotu r_{sp}</p> <p>Krátkovlnný filtr λ_s (ls)</p>	 <p>Aritmetická střední hodnota \times Maximální výška drsnosti profilu</p>																																										
<p>RSm (mm)</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>$\lambda_c = l_r$ (mm)</th> <th>l_n (mm)</th> <th>l_t (mm)</th> <th>r_{sp} (μm)</th> <th>λ_s (μm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,08</td> <td>0,40</td> <td>0,48</td> <td>2</td> <td>2,5</td> </tr> <tr> <td>0,25</td> <td>1,25</td> <td>1,5</td> <td>2</td> <td>2,5</td> </tr> <tr> <td>0,8</td> <td>4,00</td> <td>4,80</td> <td>2 nebo 5*</td> <td>2,5</td> </tr> <tr> <td>2,5</td> <td>12,5</td> <td>15,00</td> <td>5</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>8,0</td> <td>40,00</td> <td>48,00</td> <td>10</td> <td>25</td> </tr> </tbody> </table>	$\lambda_c = l_r$ (mm)	l_n (mm)	l_t (mm)	r_{sp} (μm)	λ_s (μm)	0,08	0,40	0,48	2	2,5	0,25	1,25	1,5	2	2,5	0,8	4,00	4,80	2 nebo 5*	2,5	2,5	12,5	15,00	5	8	8,0	40,00	48,00	10	25	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Ra (μm)</th> <th>Rz (μm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>> (0,006) ...0,02</td> <td>> (0,025) ...0,01</td> </tr> <tr> <td>> 0,02 ...0,1</td> <td>> 0,1 ...0,5</td> </tr> <tr> <td>> 0,10 ...2,0</td> <td>> 0,5 ...10</td> </tr> <tr> <td>> 2,00 ...10,0</td> <td>> 10 ...50</td> </tr> <tr> <td>> 10,0 ...80,0</td> <td>> 50 ...200</td> </tr> </tbody> </table>	Ra (μm)	Rz (μm)	> (0,006) ...0,02	> (0,025) ...0,01	> 0,02 ...0,1	> 0,1 ...0,5	> 0,10 ...2,0	> 0,5 ...10	> 2,00 ...10,0	> 10 ...50	> 10,0 ...80,0	> 50 ...200
$\lambda_c = l_r$ (mm)	l_n (mm)	l_t (mm)	r_{sp} (μm)	λ_s (μm)																																								
0,08	0,40	0,48	2	2,5																																								
0,25	1,25	1,5	2	2,5																																								
0,8	4,00	4,80	2 nebo 5*	2,5																																								
2,5	12,5	15,00	5	8																																								
8,0	40,00	48,00	10	25																																								
Ra (μm)	Rz (μm)																																											
> (0,006) ...0,02	> (0,025) ...0,01																																											
> 0,02 ...0,1	> 0,1 ...0,5																																											
> 0,10 ...2,0	> 0,5 ...10																																											
> 2,00 ...10,0	> 10 ...50																																											
> 10,0 ...80,0	> 50 ...200																																											

Příklad aplikace:
Použijeme metodu délky Rsm pro periodický profil. Pro Rsm v rozsahu 0,4 až 1,3 mm se nastaví následující podmínky: $\lambda_s = 2,5$ mm; $l_n = 12,5$ mm; $l_t = 15$ mm, $r_{sp} = 5$ μm ; $l_s = 8$ μm

Zkrácení standardní měřené délky l_n :
Pokud není standardní měřená délka dostatečná pro celkovou délku l_t , je počet základních délek patřičně zredukován a označen na výkresu. Pokud aktuální celková délka l_t je menší než jedna základní délka l_r , potom je vyhodnocena celková výška primárního profilu P_t místo R_t a R_z .

P6. ANALÝZA ROZPTYLU HODNOT DRSNOSTI PRO PROMĚNNÉ v_c

Tab. P 5: Analýza rozptylu hodnot drsnosti R_a za proměnných řezných podmínek

Test	Hodnota P	Lze zamítnout nulovou hypotézu?
$v_c = 140$ m/min $V = 6$ cm ³ 1. měření	0,586 > 0,05	Ne
$v_c = 140$ m/min $V = 30$ cm ³ 1. měření	0,248 > 0,05	Ne
$v_c = 140$ m/min $V = 60$ cm ³ 1. měření	0,481 > 0,05	Ne
$v_c = 140$ m/min $V = 6$ cm ³ Opakování č. 1	0,389 > 0,05	Ne
$v_c = 140$ m/min $V = 30$ cm ³ Opakování č. 1	0,412 > 0,05	Ne
$v_c = 140$ m/min $V = 60$ cm ³ Opakování č. 1	0,306 > 0,05	Ne
$v_c = 140$ m/min $V = 6$ cm ³ Opakování č. 2	0,218 > 0,05	Ne
$v_c = 140$ m/min $V = 30$ cm ³ Opakování č. 2	0,369 > 0,05	Ne
$v_c = 140$ m/min $V = 60$ cm ³ Opakování č. 2	0,255 > 0,05	Ne
$v_c = 160$ m/min $V = 6$ cm ³ 1. měření	0,514 > 0,05	Ne
$v_c = 160$ m/min $V = 30$ cm ³ 1. měření	0,497 > 0,05	Ne
$v_c = 160$ m/min $V = 60$ cm ³ 1. měření	0,211 > 0,05	Ne
$v_c = 160$ m/min $V = 6$ cm ³ Opakování č. 1	0,432 > 0,05	Ne
$v_c = 160$ m/min $V = 30$ cm ³ Opakování č. 1	0,193 > 0,05	Ne
$v_c = 160$ m/min $V = 60$ cm ³ Opakování č. 1	0,098 > 0,05	Ne
$v_c = 160$ m/min $V = 6$ cm ³	0,179 > 0,05	Ne

Opakování č. 2		
$v_c = 160 \text{ m/min}$ $V = 30 \text{ cm}^3$ Opakování č. 2	$0,357 > 0,05$	Ne
$v_c = 160 \text{ m/min}$ $V = 60 \text{ cm}^3$ Opakování č. 2	$0,067 > 0,05$	Ne
$v_c = 180 \text{ m/min}$ $V = 6 \text{ cm}^3$ 1. měření	$0,626 > 0,05$	Ne
$v_c = 180 \text{ m/min}$ $V = 30 \text{ cm}^3$ 1. měření	$0,201 > 0,05$	Ne
$v_c = 180 \text{ m/min}$ $V = 60 \text{ cm}^3$ 1. měření	$0,242 > 0,05$	Ne
$v_c = 180 \text{ m/min}$ $V = 6 \text{ cm}^3$ Opakování č. 1	$0,207 > 0,05$	Ne
$v_c = 180 \text{ m/min}$ $V = 30 \text{ cm}^3$ Opakování č. 1	$0,057 > 0,05$	Ne
$v_c = 180 \text{ m/min}$ $V = 60 \text{ cm}^3$ Opakování č. 1	$0,138 > 0,05$	Ne
$v_c = 180 \text{ m/min}$ $V = 6 \text{ cm}^3$ Opakování č. 2	$0,521 > 0,05$	Ne
$v_c = 180 \text{ m/min}$ $V = 30 \text{ cm}^3$ Opakování č. 2	$0,213 > 0,05$	Ne
$v_c = 180 \text{ m/min}$ $V = 60 \text{ cm}^3$ Opakování č. 2	$0,155 > 0,05$	Ne
$v_c = 200 \text{ m/min}$ $V = 6 \text{ cm}^3$ 1. měření	$0,189 > 0,05$	Ne
$v_c = 200 \text{ m/min}$ $V = 30 \text{ cm}^3$ 1. měření	$0,178 > 0,05$	Ne
$v_c = 200 \text{ m/min}$ $V = 60 \text{ cm}^3$ 1. měření	$0,261 > 0,05$	Ne
$v_c = 200 \text{ m/min}$ $V = 6 \text{ cm}^3$ Opakování č. 1	$0,175 > 0,05$	Ne
$v_c = 200 \text{ m/min}$ $V = 30 \text{ cm}^3$ Opakování č. 1	$0,440 > 0,05$	Ne
$v_c = 200 \text{ m/min}$ $V = 60 \text{ cm}^3$ Opakování č. 1	$0,145 < 0,05$	Ne
$v_c = 200 \text{ m/min}$ $V = 6 \text{ cm}^3$	$0,236 > 0,05$	Ne

Opakování č. 2		
$v_c = 200 \text{ m/min}$ $V = 30 \text{ cm}^3$ Opakování č. 2	Nevyhodnoceno, nekompletní data	
$v_c = 200 \text{ m/min}$ $V = 60 \text{ cm}^3$ Opakování č. 2	$0,189 > 0,05$	Ne
$v_c = 230 \text{ m/min}$ $V = 6 \text{ cm}^3$ 1. měření	$0,00079 < 0,05$	Ano
$v_c = 230 \text{ m/min}$ $V = 18 \text{ cm}^3$ 1. měření	$0,216 > 0,05$	Ne
$v_c = 230 \text{ m/min}$ $V = 30 \text{ cm}^3$ 1. měření	$0,032 < 0,05$	Ne
$v_c = 230 \text{ m/min}$ $V = 48 \text{ cm}^3$ 1. měření	$0,0005 < 0,05$	Ano
$v_c = 230 \text{ m/min}$ $V = 6 \text{ cm}^3$ Opakování č. 1	$0,003 < 0,05$	Ano
$v_c = 230 \text{ m/min}$ $V = 18 \text{ cm}^3$ Opakování č. 1	$0,066 > 0,05$	Ne
$v_c = 230 \text{ m/min}$ $V = 30 \text{ cm}^3$ Opakování č. 1	$0,021 < 0,05$	Ano
$v_c = 230 \text{ m/min}$ $V = 6 \text{ cm}^3$ Opakování č. 2	$0,121 > 0,05$	Ne
$v_c = 230 \text{ m/min}$ $V = 18 \text{ cm}^3$ Opakování č. 2	$0,009 < 0,05$	Ano
$v_c = 230 \text{ m/min}$ $V = 30 \text{ cm}^3$ Opakování č. 2	$0,038 < 0,05$	Ano
$v_c = 230 \text{ m/min}$ $V = 48 \text{ cm}^3$ Opakování č. 2	$0,011 < 0,05$	Ano

P7. M-S ANALÝZA JEDNOTLIVÝCH SLOŽEK ŘEZNÝCH SIL PRO PROMĚNNÉ v_c

V posledním desetiletí prošly technologie třískového obrábění významnými změnami, jež se týkaly vývoje nových a zlepšení stávajících technologických procesů. Neustávajícím trendem poslední doby je zvyšování kvality výrobků při současném snižování nákladů. Pro docílení těchto požadavků je nezbytné analyzovat řezný proces, tak abychom ho lépe pochopili a byli ho schopni ovládat. Řezné síly a krouticí momenty, které vznikají během řezného procesu, jsou důležitým ukazatelem, který pomáhá určovat co se děje s materiálem a řezným nástrojem. Naměřená a vyhodnocená data mohou být následně použita pro zlepšení technologických procesů, tak aby přímo ovlivnila kvalitu obrobeného povrchu, opotřebení nástroje, apod. [53]

Součástí experimentálního měření bylo tedy přímé měření silového zatížení řezného břitů nástroje. Významnou veličinou řezného procesu je celkové silové zatížení nástroje F a řezná síla F_c . F je výslednicí hodnot naměřených během experimentálního obrábění a F_c je složkou, která ovlivňuje velikost potřebného výkonu na vřetenu a nepřímou charakterizuje měrný řezný odpor (k_c). Na základě jedné nebo obou sledovaných veličin je popsán vliv sledovaných parametrů na řezný proces.

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (R. P 1)$$

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

$$F = 5 \times v_c^{0,855} \times V^{0,070} \quad (R. P 2)$$

Z výsledků v *Tab. P 6* je možné konstatovat následující. Dle hodnoty korelačního koeficientu se jedná o dosti silnou kladnou závislost. Tento výsledek lze prezentovat tak, že čím je vyšší řezná rychlost a čím vyšší je objem odebraného materiálu, tím bude dosaženo vyššího celkového silového zatížení řezného nástroje. Koeficient determinace určuje, že daný regresní model vysvětluje téměř 90% rozptylu závisle proměnné. Navržený model je jako celek statisticky významný, jelikož významnost F je menší než 2,89 (2,89 je hodnotou z tabulky kritických hodnot pro Fischer-Snedecorovo rozdělení) na hladině významnosti 0,05. Zároveň je navržený model statisticky významný i z hlediska kritických hodnot studentova rozdělení, neboť *Hodnota P* < 0,05 (dokonce *Hodnota P* < 0,0005). Bodový odhad konstanty c_f je 5 a bodový odhad regresních členů je 0,855 a 0,070. Všechny tři parametry jsou statisticky významné, jelikož při tak malé pravděpodobnosti lze nulovou hypotézu zamítnout.

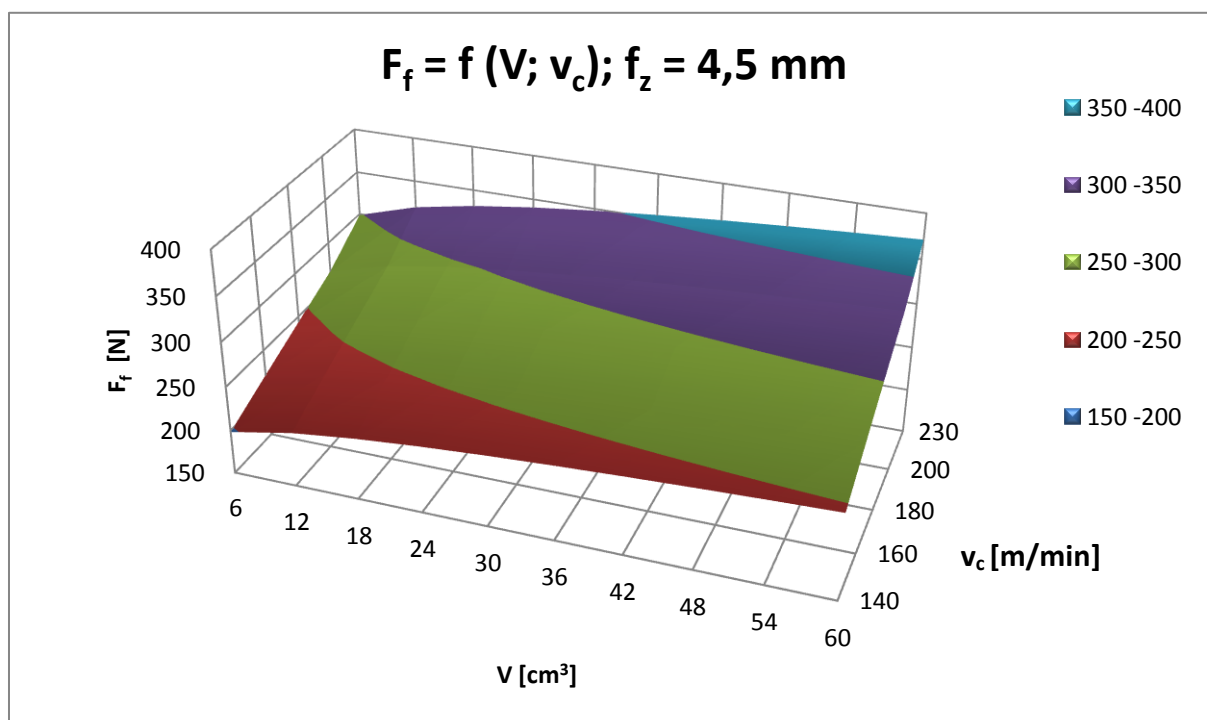
Tab. P 6: Výsledky lineární regrese pro F nástroje IN04S

Regresní statistika							
Násobné R						0,943156623	
Hodnota spolehlivosti R						0,889544416	
Nastavená hodnota spolehlivosti R						0,884844179	
Chyba stř. hodnoty						0,056337219	
Pozorování						50	
ANOVA							
	Rozdíl	SS	MS	F		Významnost F	
Regrese	2	1,201347434	0,600673717	189,2552017		3,27273E-23	
Rezidua	47	0,149172464	0,003173882				
Celkem	49	1,350519898					
	Koeficienty	Chyba stř. hodnoty	t Stat		Hodnota P	Dolní 95%	Horní 95%
Hranice	5	0,243279333	6,576901347		3,58743E-08	1,110609291	2,089439055
Soubor X 1	0,854896377	0,046285718	18,46998208		3,49512E-23	0,761781525	0,94801123
Soubor X 2	0,070037969	0,011457003	6,113114213		1,81443E-07	0,046989452	0,093086485

Tab. P 7: Výsledky lineární regrese pro F_f nástroje IN04S

Regresní statistika						
Násobné R	0,932395771					
Hodnota spolehlivosti R	0,869361875					
Nastavená hodnota spolehlivosti R	0,863802806					
Chyba stř. hodnoty	0,062717733					
Pozorování	50					
ANOVA						
	Rozdíl	SS	MS	F	Významnost F	
Regrese	2	1,230294863	0,615147431	156,3862311	1,68905E-21	
Rezidua	47	0,184875159	0,003933514			
Celkem	2	1,230294863	0,615147431	156,3862311	1,68905E-21	
Chyba stř.						
	Koeficienty	Chyba stř. hodnoty	t Stat	Hodnota P	Dolní 95%	Horní 95%
Hranice	2,802	0,270832117	3,804538833	0,000409615	0,485547374	1,575235241
Soubor X 1	0,827533641	0,051527842	16,05993216	1,03327E-20	0,723872996	0,931194286
Soubor X 2	0,094462279	0,012754575	7,406148876	1,9851E-09	0,068803384	0,120121173

$$F_f = 2,802 \times v_c^{0,828} \times V^{0,094} \quad (R. P 3)$$



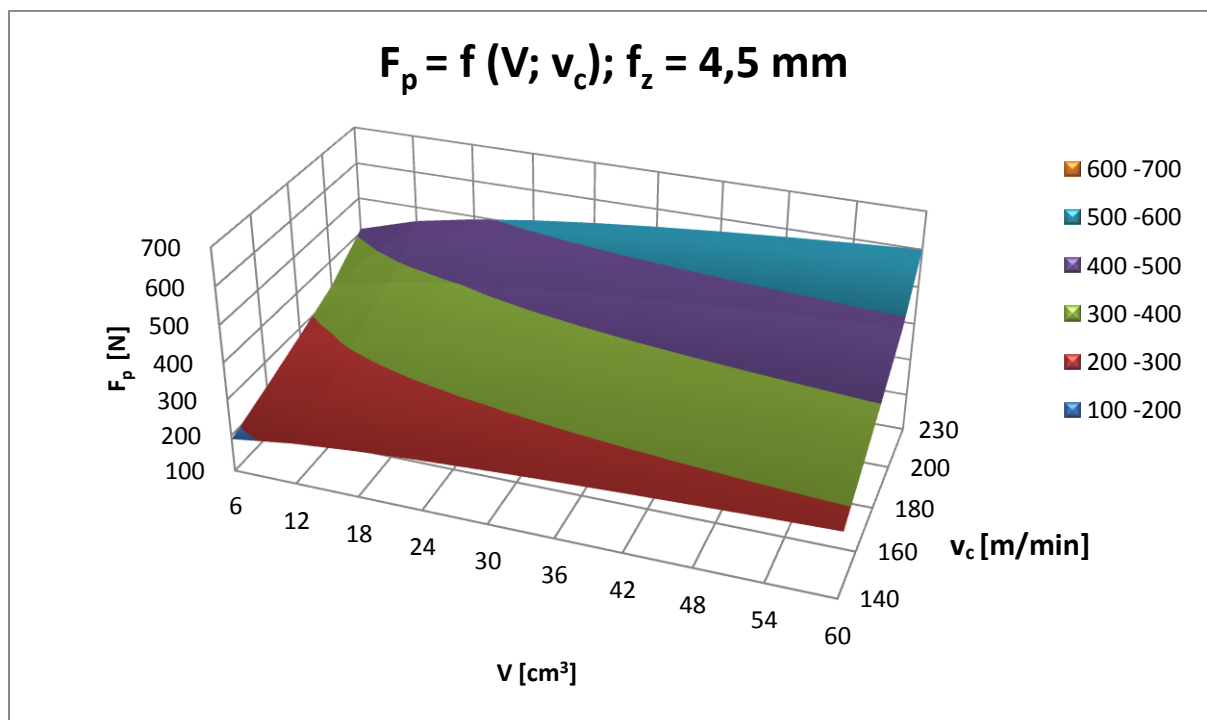
Tab. P 8: Výsledky lineární regrese pro F_p nástroje IN04S

Regresní statistika	
Násobné R	0,98018091
Hodnota spolehlivosti R	0,960754617
Nastavená hodnota spolehlivosti R	0,9590846
Chyba stř. hodnoty	0,060623674
Pozorování	50

ANOVA						
	Rozdíl	SS	MS	F	Významnost F	
Regrese	2	4,228694049	2,114347024	575,2965471	8,99563E-34	
Rezidua	47	0,172735801	0,00367523			
Celkem	49	4,40142985				

	Koeficienty	Chyba stř. hodnoty	t Stat	Hodnota P	Dolní 95%	Horní 95%
Hranice	0,066	0,261789404	-10,3878572	9,24489E-14	-3,24608331	-2,19277862
Soubor X 1	1,552103807	0,049807398	31,16211406	4,84025E-33	1,451904249	1,652303365
Soubor X 2	0,165184445	0,012328717	13,39834846	1,15153E-17	0,140382266	0,189986624

$$F_p = 0,066 \times v_c^{1,552} \times V^{0,165} \quad (R. P 4)$$



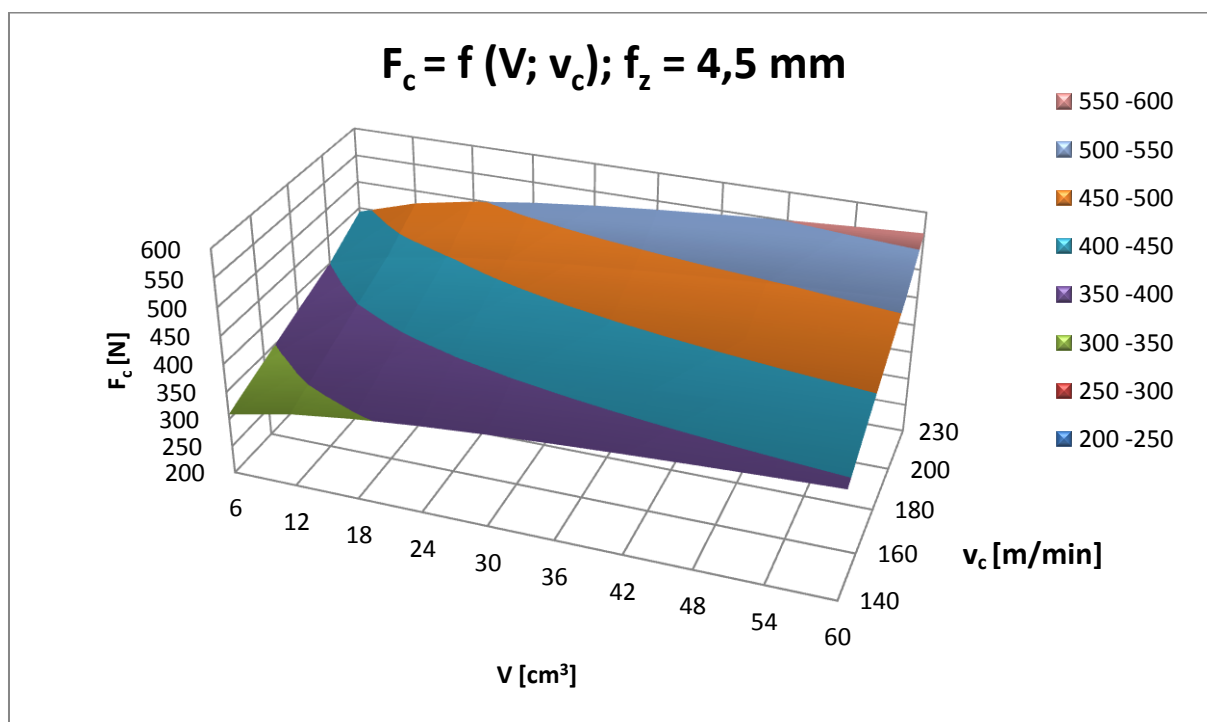
Tab. P 9: Výsledky lineární regrese pro F_c nástroje IN04S

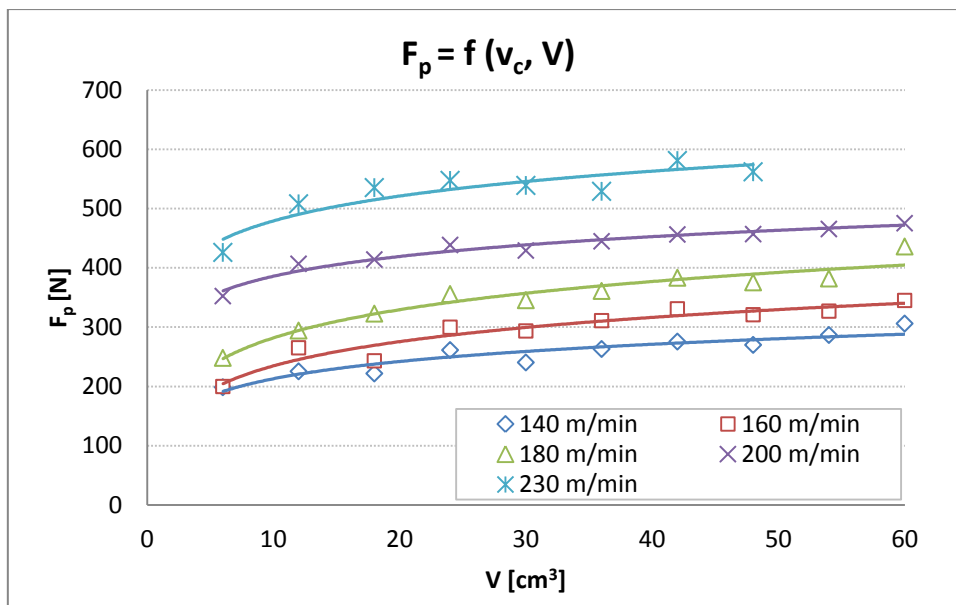
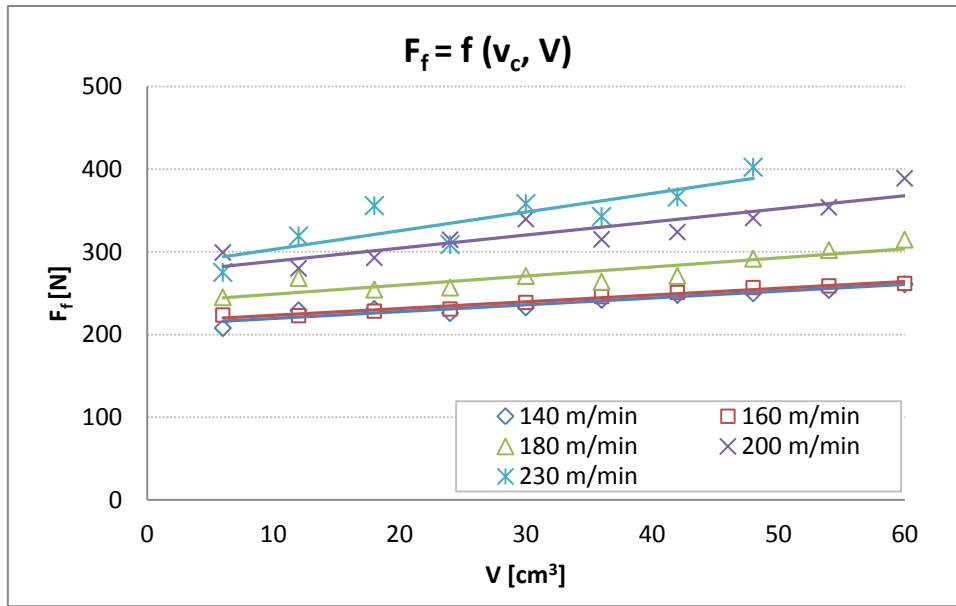
Regresní statistika	
Násobné R	0,904283701
Hodnota spolehlivosti R	0,817729012
Nastavená hodnota spolehlivosti R	0,8099728
Chyba stř. hodnoty	0,070444243
Pozorování	50

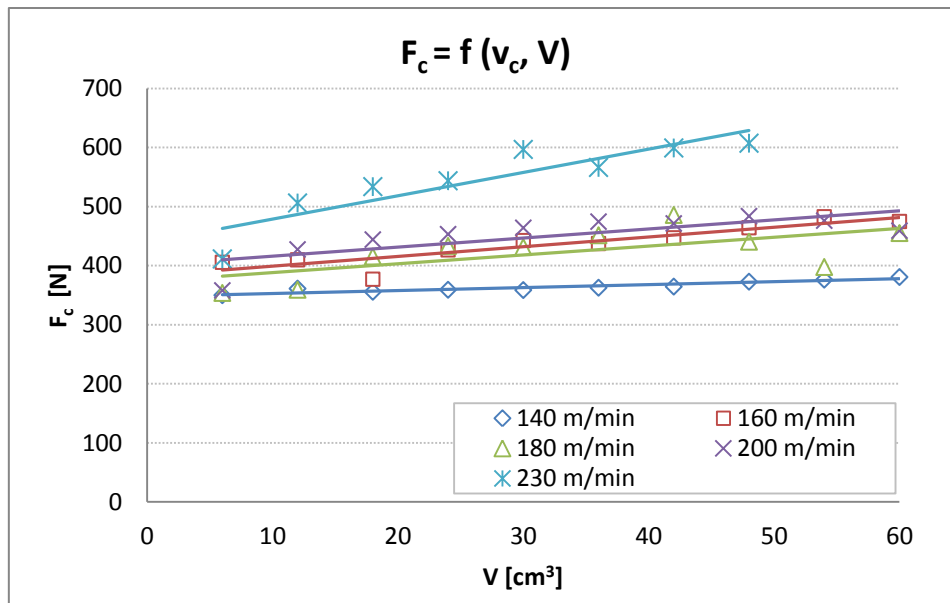
ANOVA						
	Rozdíl	SS	MS	F	Významnost F	
Regrese	2	1,046359025	0,523179513	105,4289109	4,23509E-18	
Rezidua	47	0,233232392	0,004962391			
Celkem	49	1,279591417				

	Chyba stř.					
	Koeficienty	hodnoty	t Stat	Hodnota P	Dolní 95%	Horní 95%
Hranice	1,959292625	0,304197274	6,440861869	5,77337E-08	1,347326655	2,571258596
Soubor X 1	0,725608012	0,057875813	12,53732733	1,33825E-16	0,609176896	0,842039128
Soubor X 2	0,104954257	0,014325874	7,326202649	2,62134E-09	0,076134316	0,133774198

$$F_c = 7,094 \times v_c^{0,726} \times V^{0,105} \quad (R. P 5)$$







P8. M-S ANALÝZA JEDNOTLIVÝCH SLOŽEK ŘEZNÝCH SIL PRO PROMĚNNÉ r_n

Tak jako každé měření i měření řezných sil je zatíženo určitou chybou. Aby byla chyba měření co nejnižší, bylo před samotným měřením nutné správně nastavit dynamometr, tzn., že byla zjišťována vlastní frekvence soustavy. Za soustavu je považován dynamometr pevně upnutý na pracovním stole obráběcího stroje a pevně upnutý obrobek na dynamometr. Z hodnoty vlastní frekvence soustavy byla stanovena maximální hodnota otáček nástroje, potažmo řezné rychlosti tak, aby byla chyba měření zatížena maximálně 5% chybou vlastní frekvence. S takto nastaveným procesem bylo realizováno experimentální měření.

Experimenty byly minimálně 2x opakovány. Výsledkem experimentálního testování byly nalezené výsledky, jež můžeme označit x_i . Nalezený výsledek však může být zatížen určitou chybou, která skutečnou hodnotu μ bude zkreslovat. Proto byly naměřené hodnoty řezných sil testovány na přítomnost hrubé chyby dle Dean-Dixonova testu. Vypočtené veličiny byly porovnány s kritickou hodnotou pro zvolenou hladinu významnosti a odlehle výsledky byly pro vytváření závislostí vyloučeny.

Dean-Dixonův test:

$$Q_1 = \frac{x_2 - x_1}{R} \text{ nebo } Q_n = \frac{x_n - x_{n-1}}{R} \quad (R. P 6)$$

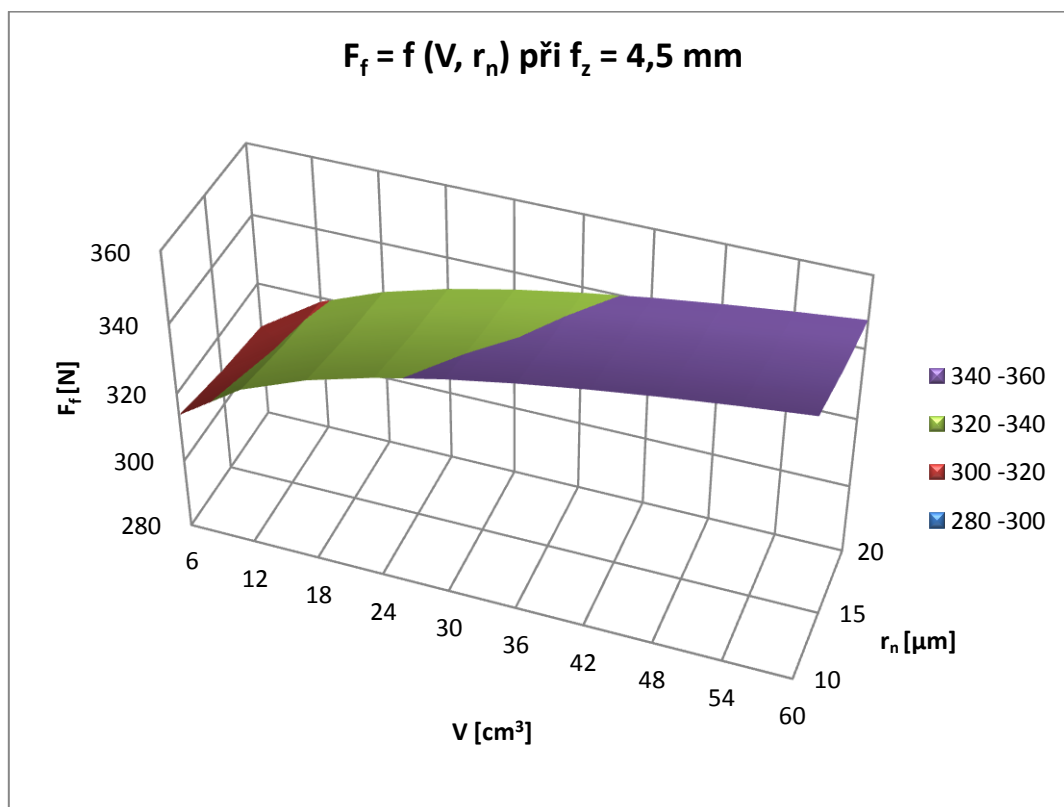
kde: $R = x_{\max} - x_{\min}$...rozpětí, testovány jsou dva sousední výsledky v posloupnosti hodnot x_1 až x_n ... nalezené výsledky (naměřené hodnoty)

Tab. P 10: Výsledky lineární regrese pro F_f nástroje s proměnným r_n

Regresní statistika						
Násobné R	0,597508774					
Hodnota spolehlivosti R	0,357016736					
Nastavená hodnota spolehlivosti R	0,309388346					
Chyba stř. hodnoty	0,054893509					
Pozorování	30					
ANOVA						
	Rozdíl	SS	MS	F	Významnost F	
Regrese	2	2	0,045174636	0,022587318	7,495880836	
Rezidua	47	27	0,081359029	0,003013297		
Celkem	49	29	0,126533664			
	Koeficienty	Chyba stř. hodnoty	t Stat	Hodnota P	Dolní 95%	Horní 95%
Hranice	5,723736367	0,10589735	54,04985475	4,65712E-29	5,506452956	5,941019778
Soubor X 1	0,031394512	0,035247679	0,890683116	0,380967611	0,103716774	0,040927749
Soubor X 2	0,054305197	0,014411892	3,768082438	0,000814742	0,024734438	0,083875957

$$F_f = 306 \times r_n^{-0,031} \times V^{0,054}$$

(R. P 7)



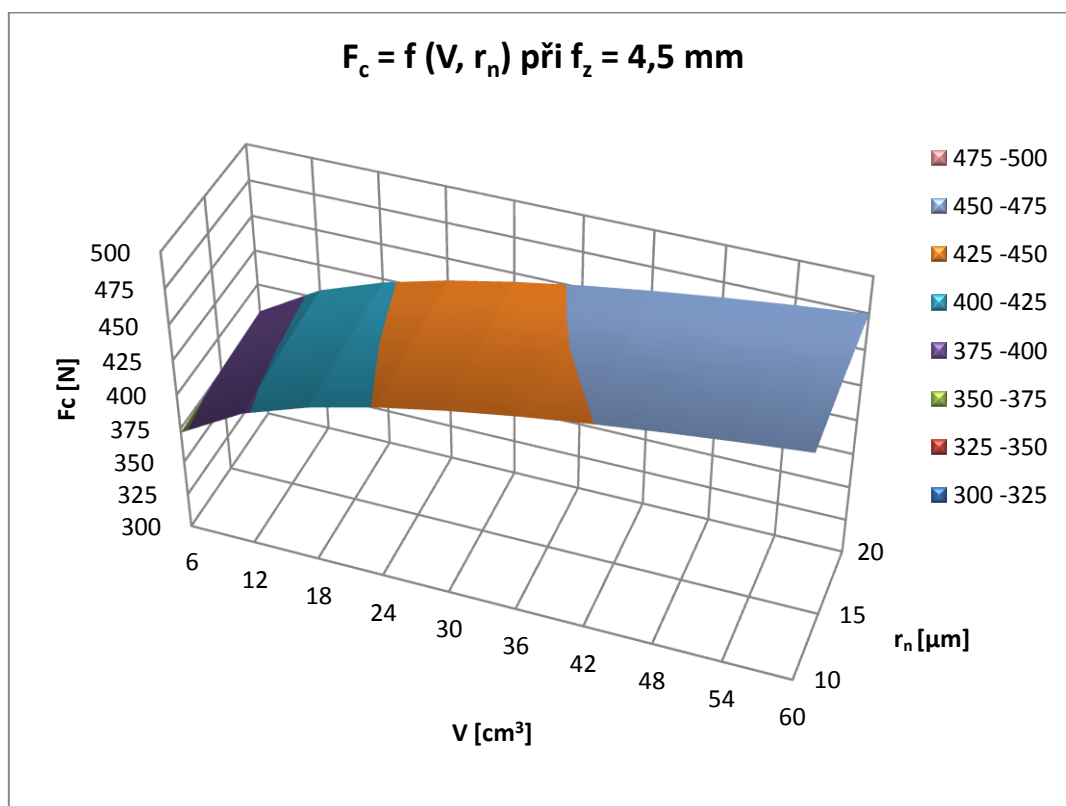
Tab. P 11: Výsledky lineární regrese pro F_c nástroje s proměnným r_n

Regresní statistika	
Násobné R	0,828226932
Hodnota spolehlivosti R	0,685959851
Nastavená hodnota spolehlivosti R	0,662697618
Chyba stř. hodnoty	0,048432594
Pozorování	30

ANOVA						
	Rozdíl	SS	MS	F	Významnost F	
Regrese	2	0,138341583	0,069170791	29,48813396	1,6192E-07	
Rezidua	27	0,063334335	0,002345716			
Celkem	29	0,201675918				

	Chyba stř.					
	Koeficienty	hodnoty	t Stat	Hodnota P	Dolní 95%	Horní 95%
Hranice	5,678464644	0,093433329	60,77557879	2,01249E-30	5,48675529	5,870173997
Soubor X 1	0,029237372	0,031099059	0,940136857	0,355482872	0,034572626	0,09304737
Soubor X 2	0,096916435	0,012715626	7,621837745	3,37512E-08	0,070826126	0,123006743

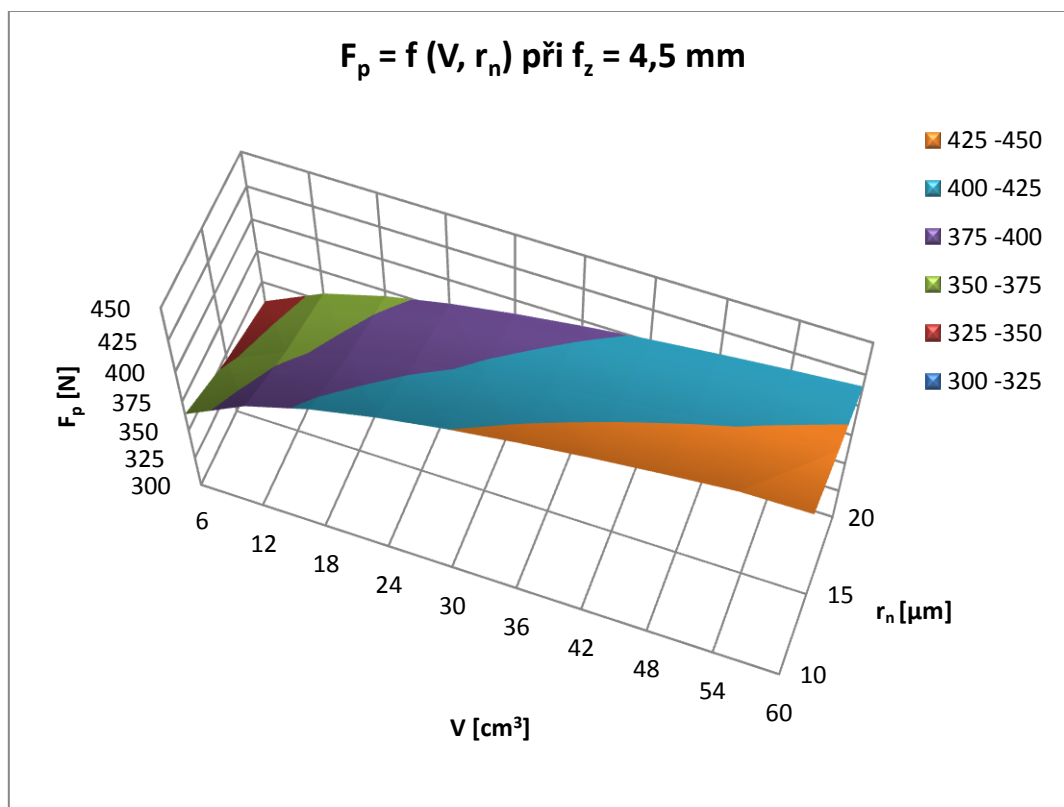
$$F_c = 292 \times r_n^{0,029} \times V^{0,097} \quad (R. P 8)$$



Tab. P 12: Výsledky lineární regrese pro F_p nástroje s proměnným r_n

Regresní statistika						
Násobné R	0,9160893					
Hodnota spolehlivosti R	0,839219606					
Nastavená hodnota spolehlivosti R	0,827309948					
Chyba stř. hodnoty	0,034800541					
Pozorování	30					
ANOVA						
	Rozdíl	SS	MS	F	Významnost F	
Regrese	2	0,170678294	0,085339147	70,4654618	1,92374E-11	
Rezidua	27	0,032699097	0,0012111078			
Celkem	29	0,203377391				
Chyba stř. hodnoty						
	Koeficienty	Chyba stř. hodnoty	t Stat	Hodnota P	Dolní 95%	Horní 95%
Hranice	6,017199828	0,06713517	89,6281312	5,89735E-35	5,879449839	6,154949817
Soubor X 1	0,126128298	0,02234578	5,644389991	5,42654E-06	0,171978051	0,080278545
Soubor X 2	0,095420615	0,009136629	10,44374383	5,54844E-11	0,076673801	0,114167429

$$F_p = 410 \times r_n^{-0,126} \times V^{0,095} \quad (R. P 9)$$



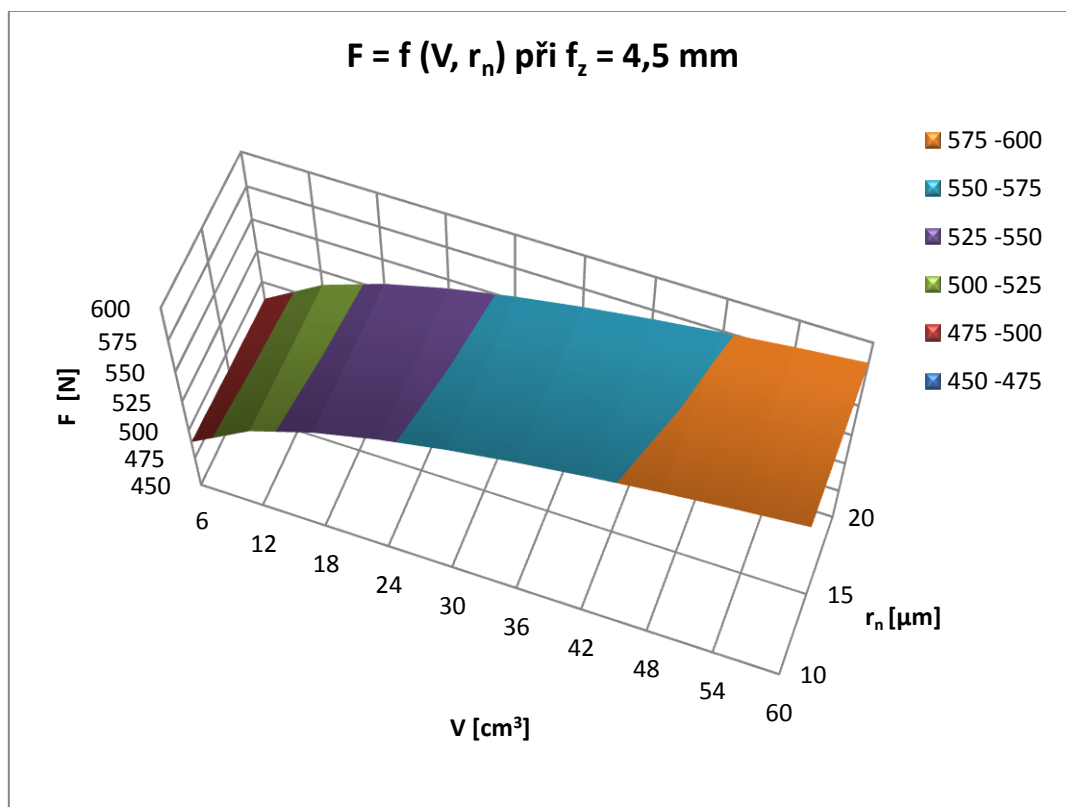
Tab. P 13: Výsledky lineární regrese pro F_p nástroje s proměnným r_n

Regresní statistika	
Násobné R	0,880090934
Hodnota spolehlivosti R	0,774560052
Nastavená hodnota spolehlivosti R	0,757860796
Chyba stř. hodnoty	0,031837952
Pozorování	30

ANOVA						
	Rozdíl	SS	MS	F	Významnost F	
Regrese	2	0,094032553	0,047016277	46,38290939	1,84466E-09	
Rezidua	27	0,02736869	0,001013655			
Celkem	29	0,121401243				

	Chyba stř.					
	Koeficienty	hodnoty	t Stat	Hodnota P	Dolní 95%	Horní 95%
Hranice	6,076024792	0,061419916	98,92597023	4,13689E-36	5,950001535	6,202048049
Soubor X 1	0,011431652	0,020443472	0,559183519	0,580645638	0,053378191	0,030514886
Soubor X 2	0,080372216	0,008358823	9,615255201	3,27223E-10	0,063221328	0,097523104

$$F = 435 \times r_n^{-0,011} \times V^{0,08} \quad (R. P 10)$$



P9. ANALÝZA ROZPTYLU HODNOT DRSNOSTI Ra PRO PROMĚNNÉ r_n

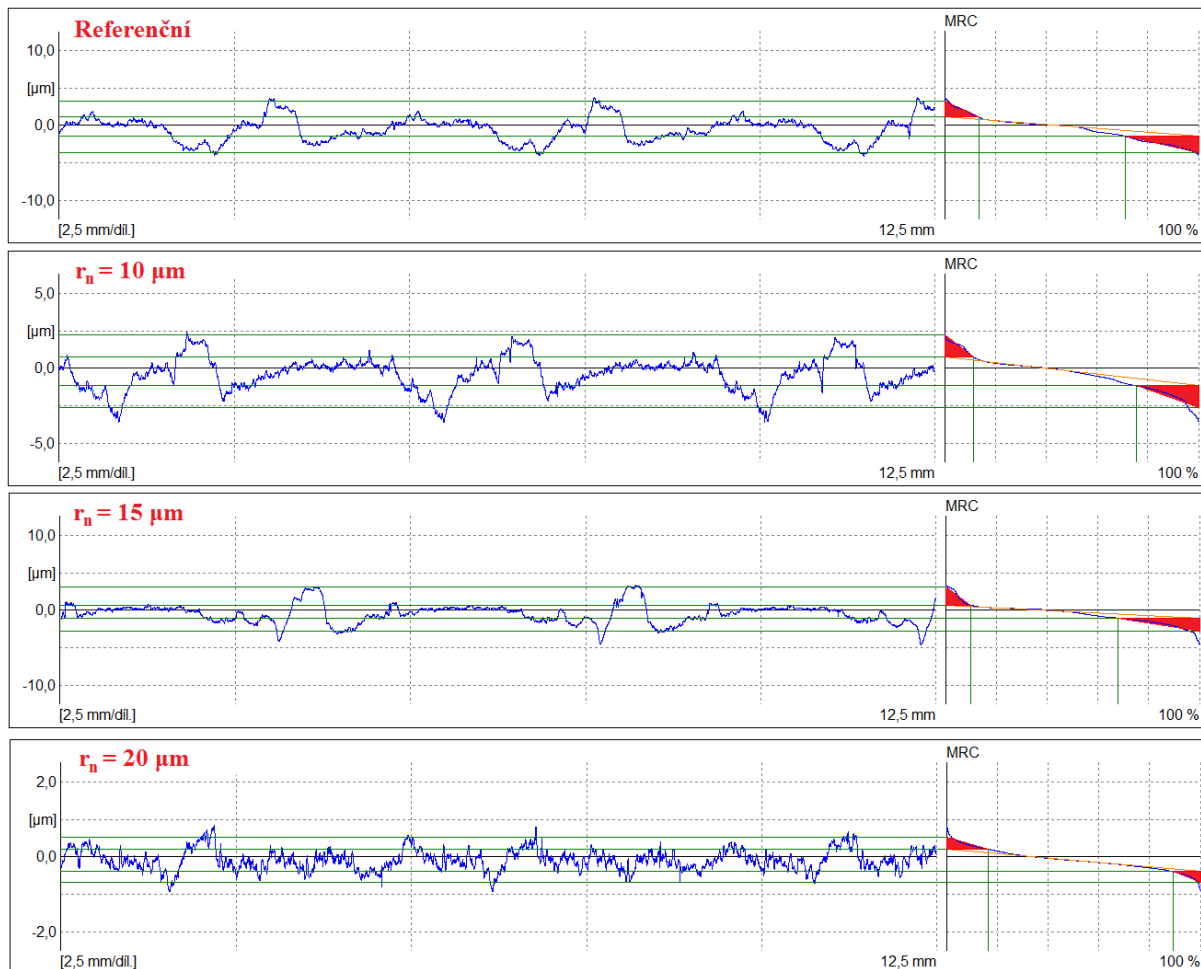
Test	Hodnota P	Lze zamítnout nulovou hypotézu?
$r_n = 10 \mu\text{m}$ $V = 6 \text{ cm}^3$ 1. měření	0,357 > 0,05	Ne
$r_n = 10 \mu\text{m}$ $V = 30 \text{ cm}^3$ 1. měření	0,303 > 0,05	Ne
$r_n = 10 \mu\text{m}$ $V = 60 \text{ cm}^3$ 1. měření	0,469 > 0,05	Ne
$r_n = 10 \mu\text{m}$ $V = 6 \text{ cm}^3$ Opakování č. 1	0,0608 > 0,05	Ne
$r_n = 10 \mu\text{m}$ $V = 30 \text{ cm}^3$ Opakování č. 1	0,161 > 0,05	Ne
$r_n = 10 \mu\text{m}$ $V = 60 \text{ cm}^3$ Opakování č. 1	0,084 > 0,05	Ne
$r_n = 10 \mu\text{m}$ $V = 6 \text{ cm}^3$ Opakování č. 2	0,254 > 0,05	Ne
$r_n = 10 \mu\text{m}$ $V = 30 \text{ cm}^3$ Opakování č. 2	0,126 > 0,05	Ne
$r_n = 10 \mu\text{m}$ $V = 60 \text{ cm}^3$ Opakování č. 2	0,231 > 0,05	Ne
$r_n = 15 \mu\text{m}$ $V = 6 \text{ cm}^3$ 1. měření	0,064 > 0,05	Ne
$r_n = 15 \mu\text{m}$ $V = 30 \text{ cm}^3$ 1. měření	0,283 > 0,05	Ne
$r_n = 15 \mu\text{m}$ $V = 60 \text{ cm}^3$ 1. měření	0,0528 > 0,05	Ne
$r_n = 15 \mu\text{m}$ $V = 6 \text{ cm}^3$ Opakování č. 1	0,0511 > 0,05	Ne
$r_n = 15 \mu\text{m}$ $V = 30 \text{ cm}^3$ Opakování č. 1	0,0879 > 0,05	Ne
$r_n = 15 \mu\text{m}$ $V = 60 \text{ cm}^3$ Opakování č. 1	0,101 > 0,05	Ne

$r_n = 15 \mu\text{m}$ $V = 6 \text{ cm}^3$ Opakování č. 2	$0,0876 > 0,05$	Ne
$r_n = 15 \mu\text{m}$ $V = 30 \text{ cm}^3$ Opakování č. 2	$0,0601 > 0,05$	Ne
$r_n = 15 \mu\text{m}$ $V = 60 \text{ cm}^3$ Opakování č. 2	$0,0745 > 0,05$	Ne
$r_n = 20 \mu\text{m}$ $V = 6 \text{ cm}^3$ 1. měření	$0,342 > 0,05$	Ne
$r_n = 20 \mu\text{m}$ $V = 30 \text{ cm}^3$ 1. měření	$0,155 > 0,05$	Ne
$r_n = 20 \mu\text{m}$ $V = 60 \text{ cm}^3$ 1. měření	$0,245 > 0,05$	Ne
$r_n = 20 \mu\text{m}$ $V = 6 \text{ cm}^3$ Opakování č. 1	$0,461 > 0,05$	Ne
$r_n = 20 \mu\text{m}$ $V = 30 \text{ cm}^3$ Opakování č. 1	$0,119 > 0,05$	Ne
$r_n = 20 \mu\text{m}$ $V = 60 \text{ cm}^3$ Opakování č. 1	$0,442 > 0,05$	Ne
$r_n = 20 \mu\text{m}$ $V = 6 \text{ cm}^3$ Opakování č. 2	$0,0738 > 0,05$	Ne
$r_n = 20 \mu\text{m}$ $V = 30 \text{ cm}^3$ Opakování č. 2	$0,289 > 0,05$	Ne
$r_n = 20 \mu\text{m}$ $V = 60 \text{ cm}^3$ Opakování č. 2	$0,104 > 0,05$	Ne
referenční $V = 6 \text{ cm}^3$ 1. měření	$0,722 > 0,05$	Ne
referenční $V = 30 \text{ cm}^3$ 1. měření	$0,995 > 0,05$	Ne
referenční $V = 60 \text{ cm}^3$ 1. měření	$0,988 > 0,05$	Ne
referenční $V = 6 \text{ cm}^3$ Opakování č. 1	$0,0522 > 0,05$	Ne
referenční $V = 30 \text{ cm}^3$ Opakování č. 1	$0,188 > 0,05$	Ne
referenční $V = 60 \text{ cm}^3$ Opakování č. 1	$0,323 > 0,05$	Ne

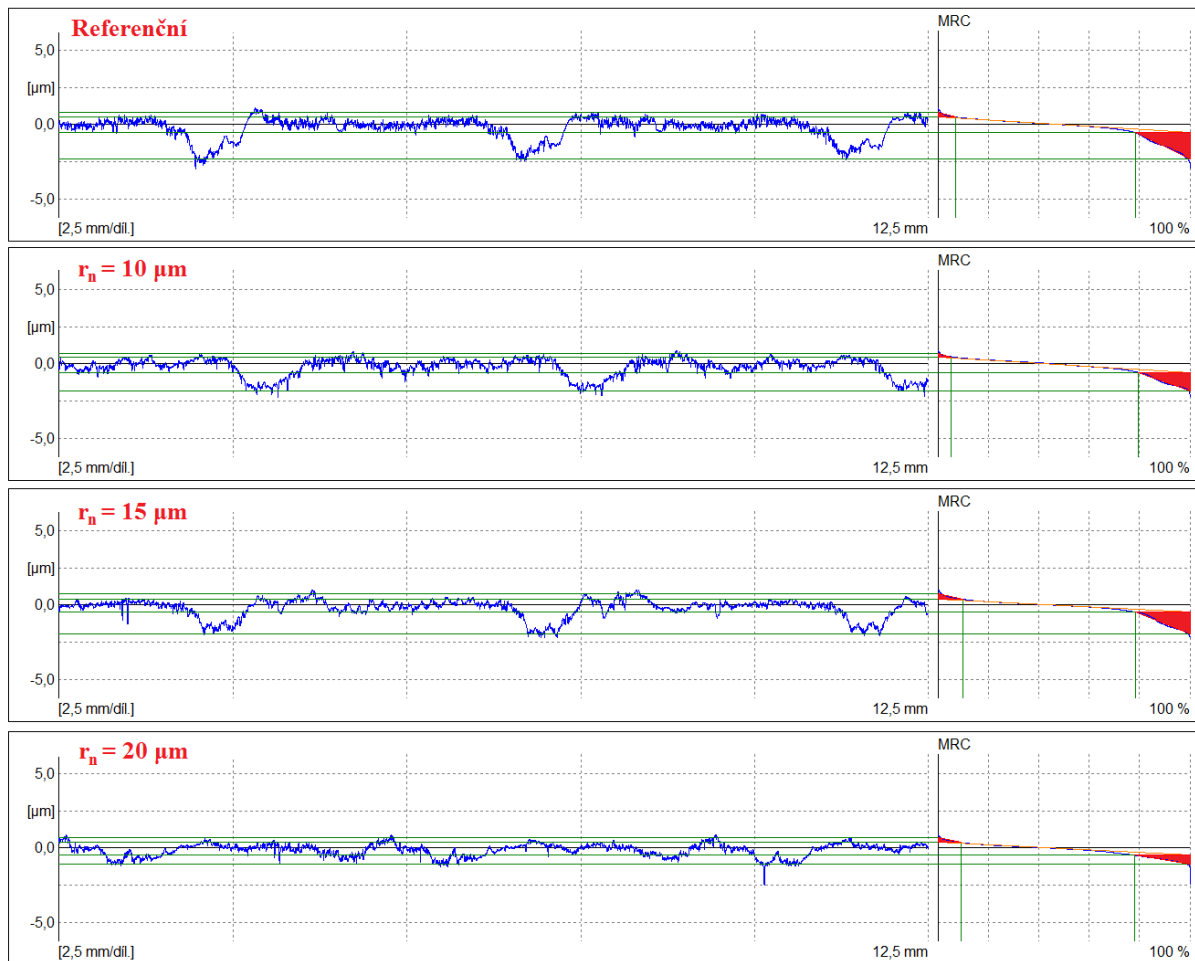
referenční $V = 6 \text{ cm}^3$ Opakování č. 2	$0,531 > 0,05$	Ne
referenční $V = 30 \text{ cm}^3$ Opakování č. 2	$0,253 > 0,05$	Ne
referenční $V = 60 \text{ cm}^3$ Opakování č. 2	$0,301 > 0,05$	Ne

P10. KŘIVKY PROFILU POVRCHU A NOSNÁ KŘIVKA PROFILU (ABBOTTOVA NOSNÁ KŘIVKA) PRO PROMĚNNÉ

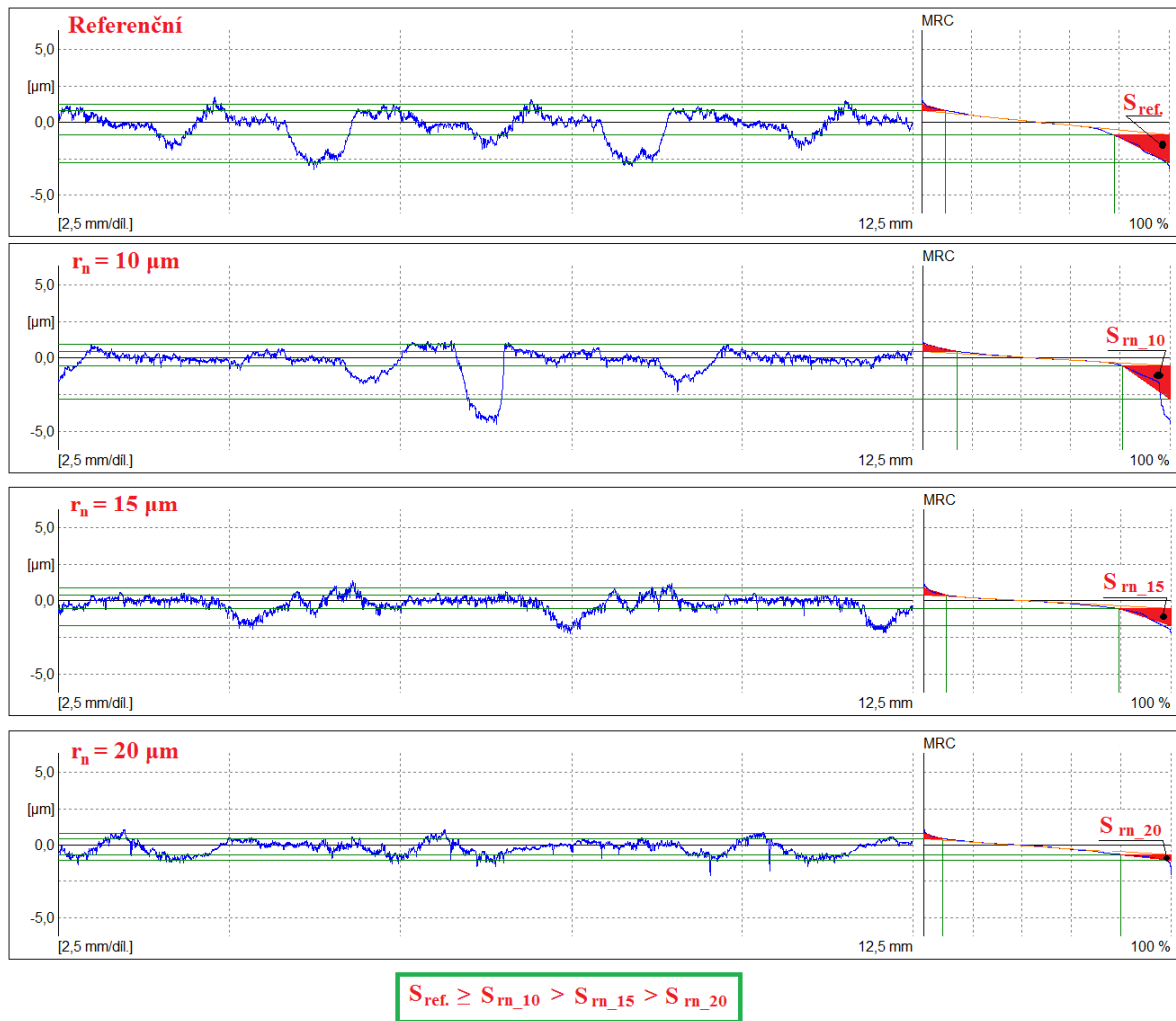
r_n



Obr. P 13: Nosná křivka profilu pro proměnné r_n po $V = 6 \text{ cm}^3$

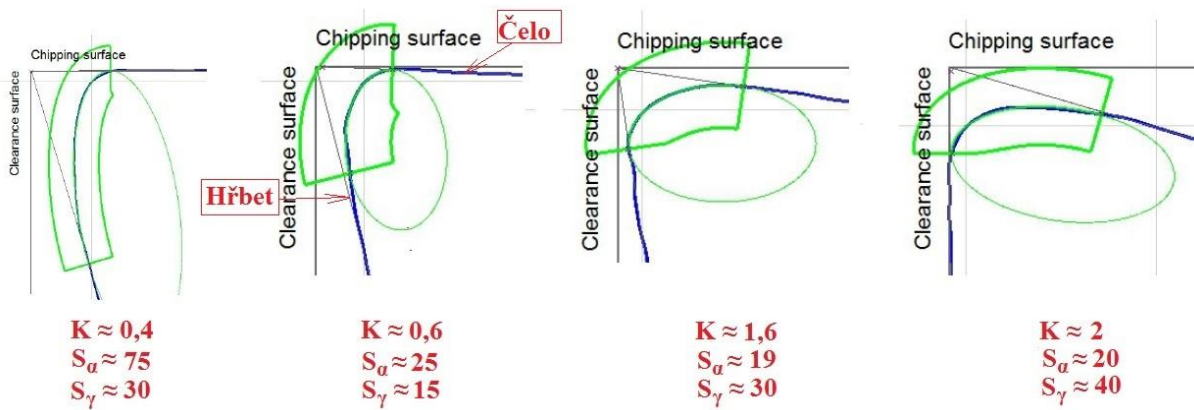


Obr. P 14: Nosná křivka profilu pro proměnné r_n po $V = 30 \text{ cm}^3$



Obr. P 15: Nosná křivka profilu pro proměnné r_n po $V = 60 \text{ cm}^3$

P11. SKUTEČNÝ TVAR OSTŘÍ NÁSTROJE S PROMĚNNÝM K



P12. ANALÝZA ROZPTYLU HODNOT DRSNOSTI Ra PRO PROMĚNNÉ K

Test	Hodnota P	Lze zamítnout nulovou hypotézu?
K = 0,4 V = 6 cm ³ 1. měření	0,365 > 0,05	Ne
K = 0,4 V = 30 cm ³ 1. měření	0,277 > 0,05	Ne
K = 0,4 V = 60 cm ³ 1. měření	0,217 > 0,05	Ne
K = 0,4 V = 6 cm ³ Opakování č. 1	0,134 > 0,05	Ne
K = 0,4 V = 30 cm ³ Opakování č. 1	0,211 > 0,05	Ne
K = 0,4 V = 60 cm ³ Opakování č. 1	0,189 > 0,05	Ne
K = 0,4 V = 6 cm ³ Opakování č. 2	0,181 > 0,05	Ne
K = 0,4 V = 30 cm ³ Opakování č. 2	0,0093 > 0,05	Ano
K = 0,4 V = 60 cm ³ Opakování č. 2	0,086 > 0,05	Ne
K = 0,6 V = 6 cm ³ 1. měření	0,265 > 0,05	Ne
K = 0,6 V = 30 cm ³ 1. měření	0,977 > 0,05	Ne
K = 0,6 V = 60 cm ³ 1. měření	0,586 > 0,05	Ne
K = 0,6 V = 6 cm ³ Opakování č. 1	0,125 > 0,05	Ne
K = 0,6 V = 30 cm ³ Opakování č. 1	0,738 > 0,05	Ne
K = 0,6 V = 60 cm ³ Opakování č. 1	0,419 > 0,05	Ne

K = 0,6 V = 6 cm ³ Opakování č. 2	0,403 > 0,05	Ne
K = 0,6 V = 30 cm ³ Opakování č. 2	0,142 > 0,05	Ne
K = 0,6 V = 60 cm ³ Opakování č. 2	0,095 > 0,05	Ne
K = 1,6 V = 6 cm ³ 1. měření	0,788 > 0,05	Ne
K = 1,6 V = 30 cm ³ 1. měření	0,203 > 0,05	Ne
K = 1,6 V = 60 cm ³ 1. měření	0,306 > 0,05	Ne
K = 1,6 V = 6 cm ³ Opakování č. 1	0,496 > 0,05	Ne
K = 1,6 V = 30 cm ³ Opakování č. 1	0,485 > 0,05	Ne
K = 1,6 V = 60 cm ³ Opakování č. 1	0,316 > 0,05	Ne
K = 1,6 V = 6 cm ³ Opakování č. 2	0,166 > 0,05	Ne
K = 1,6 V = 30 cm ³ Opakování č. 2	0,002 > 0,05	Ano
K = 1,6 V = 60 cm ³ Opakování č. 2	0,112 > 0,05	Ne
K = 2 V = 6 cm ³ 1. měření	0,468 > 0,05	Ne
K = 2 V = 30 cm ³ 1. měření	0,559 > 0,05	Ne
K = 2 V = 60 cm ³ 1. měření	0,478 > 0,05	Ne
K = 2 V = 6 cm ³ Opakování č. 1	0,152 > 0,05	Ne
K = 2 V = 30 cm ³ Opakování č. 1	0,305 > 0,05	Ne
K = 2 V = 60 cm ³ Opakování č. 1	0,316 > 0,05	Ne

K = 2 V = 6 cm ³ Opakování č. 2	0,262 > 0,05	Ne
K = 2 V = 30 cm ³ Opakování č. 2	0,840 > 0,05	Ano
K = 2 V = 60 cm ³ Opakování č. 2	0,123 > 0,05	Ne