



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

**Hodnocení nástrojů při obrábění slitiny
niklu frézováním**

**Evaluation of tools for machining of nickel
alloy during milling**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2019

Bc. Vojtěch Forman

Studijní program: N 2301 STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 3911T035 Výrobní a materiálové inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Vítězslav Rázek, CSc.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma „Hodnocení nástrojů při obrábění slitin niklu frézováním“ jsem vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Vítězslava Rázka, CSc. Veškeré použité prameny jsem uvedl dle zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a zákona č. 89/2012 Sb., občanský zákoník, v seznamu použité literatury.

V Praze dne _____

Vojtěch Forman

Bibliografická citace

FORMAN, Vojtěch. *Hodnocení nástrojů při obrábění slitiny niklu frézováním*. Praha, 2019.

Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing.

Vítězslav Rázek, CSc.

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu své diplomové práce Ing. Vítězslavu Rázkovi, CSc. za odborné rady, trpělivost a vstřícnost při vedení mé diplomové práce. Dále děkuji Ing. Zdeňku Pitrmucovi zejména za jeho cenné rady a pomoc u experimentální části této práce.

Anotace

Cílem diplomové práce je zhodnocení kvality povrchu obráběné niklové slitiny Inconel 713 LC na základě integrity povrchu a vliv na nástroje při jejím frézování. Součástí tohoto zhodnocení je analýza sil, které vznikají při čelním frézování, měření drsnosti povrchu a tvrdosti ve zpevněné povrchové vrstvě po obrábění a analýza zbytkových napětí. Zároveň bude provedeno měření opotřebení nástrojů po obrábění. Teoretická část bude obsahovat úvod do problematiky niklových slitin a jejich obrábění. Dále bude v teoretické části přiblížena problematika integrity povrchu a metody jejího měření, včetně mechanismů opotřebení nástroje při obrábění. Experimentální část pak bude zaměřena na samotné měření a vyhodnocování sil při čelním frézování, opotřebení nástrojů a integrity povrchu s ohledem na různé řezné podmínky a různou geometrii nástroje.

Klíčová slova

Nikl, Inconel, čelní frézování, integrita povrchu, síly při obrábění, drsnost, opotřebení nástroje, mikrotvrdost, zpevnění, zbytková napětí

Abstract

The aim of this thesis is to evaluate the surface quality of machined nickel alloy Inconel 713 LC on the basis of surface integrity and influence on the tools during its milling. Part of this assessment is the analysis of the forces generated by face milling, surface roughness measurements, hardness in the reinforced surface layer after machining and residual stresses analysis. The after machining tools wear will be measured as well. The theoretical part will include an introduction to nickel alloys and their machining. Further, in the theoretical part, the issue of surface integrity and methods of its measurement, including tool wear mechanisms during machining, will be discussed. The experimental part will then be focused on the measurement and evaluation of forces in face milling, tool wear and surface integrity with respect to different cutting conditions and different tool geometry.

Key words

Nickel, Inconel, face milling, surface integrity, cutting forces, roughness, tool wear, microhardness, hardening, residual stress



Obsah

SEZNAM ZNAČEK A SYMBOLŮ	10
1. ÚVOD	12
CÍLE PRÁCE:.....	13
2. NIKL.....	14
2.1. MECHANICKÉ VLASTNOSTI NIKLU	14
2.2. VÝSKYT NIKLU A JEHO VÝROBA	14
3. NIKLOVÉ SLITINY.....	15
3.1. NEREZOVÉ OCELI	15
3.2. SLITINY Ni – CU	15
3.3. SLITINY Ni – CR	15
3.4. SLITINY Ni – CR – FE.....	15
3.5. SLITINY S NÍZKOU TEPELNOU ROZTAŽNOSTÍ.....	15
3.6. MAGNETICKÉ SLITINY	16
3.7. TERMOČLÁNKOVÉ SLITINY.....	16
3.8. ŽÁRUPEVNÉ SLITINY	16
3.8.1. Historie žárupevných slitin.....	16
3.8.2. Vliv legujících prvků na vlastnosti žárupevných ocelí.....	16
4. KONTAKTNÍ MĚŘENÍ DRSNOSTI	17
4.1. MIKROGEOMETRIE	17
4.2. FILTRACE PROFILU.....	19
4.3. PRINCIP KONTAKTNÍHO MĚŘENÍ DRSNOSTI	19
4.4. VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ DRSNOSTI.....	20
4.5. POSTUP MĚŘENÍ.....	20
5. MĚŘENÍ SIL	21
5.1. SÍLY PŘI ŘEZÁNÍ.....	21
5.2. NEPŘÍMÉ MĚŘENÍ SIL PŘI OBRÁBĚNÍ	22
5.3. PŘÍMÉ MĚŘENÍ SIL PŘI OBRÁBĚNÍ	23
5.4. DYNAMOMETRY.....	23
5.4.1. Dynamometry s pružným členem	24
5.4.2. Dynamometry bez pružného členu	26
6. CHARAKTERISTIKA TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ.....	29
6.1. NESOUSLEDNÉ FRÉZOVÁNÍ	30
6.2. SOUSLEDNÉ FRÉZOVÁNÍ.....	31
6.3. ČELNÍ FRÉZOVÁNÍ	31
6.4. GEOMETRIE FRÉZOVACÍCH NÁSTROJŮ S VYMĚNITELNÝMI BŘITOVÝMI DESTIČKAMI (VBD)	32
7. OBROBITELNOST.....	33
7.1. ZNAČENÍ OBROBITELNOSTI MATERIÁLŮ.....	33
8. OBRÁBĚNÍ NIKLOVÝCH SLITIN	36
8.1. OPOTŘEBENÍ NÁSTROJE.....	36
8.1.1. Abrazivní otěr.....	37
8.1.2. Difuzní opotřebení.....	37
8.1.3. Adhezní otěr.....	38



8.1.4.	Plastická deformace	38
8.1.5.	Křehký lom	38
8.2.	VOLBA MATERIÁLU ŘEZNÉHO NÁSTROJE	39
8.2.1.	Rychlořezná ocel	39
8.2.2.	Slituté karbidy (SK)	40
8.2.3.	Polykrystalický kubický nitrid bóru (KNB).....	41
8.2.4.	Řezná keramika	42
8.2.5.	Polykrystalický diamant (PKD)	42
9.	MECHANICKÉ VLASTNOSTI POVRCHOVÉ VRSTVY OBROBKU	42
9.1.	ZMĚNA PEVNOSTI	42
9.2.	ZPEVNĚNÍ.....	43
9.3.	MIKROTVRDOST.....	44
9.3.1.	Měření mikrotvrdosti	44
9.4.	ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ	46
9.4.1.	Rozdělení zbytkových napětí	47
9.4.2.	Vznik zbytkových napětí	47
9.4.3.	Měření zbytkových napětí	48
10.	SUPERSLITINA INCONEL 713 LC	50
11.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	51
11.1.	MĚŘENÍ SIL PŘI ČELNÍM FRÉZOVÁNÍ	51
11.1.1.	Postup měření.....	53
11.1.2.	Vyhodnocení měření	53
11.1.3.	Naměřené hodnoty sil	55
11.1.4.	Porovnání řezných sil a měrných řezných sil pro různé geometrie nástroje při konstantní řezné rychlosti 35 m/min	73
11.1.5.	Závěrečné hodnocení měření sil	75
11.2.	MĚŘENÍ DRSNOSTI.....	76
11.2.1.	Postup měření drsností.....	76
11.2.2.	Naměřené hodnoty	77
11.2.3.	Porovnání mikrogeometrie povrchu při různých geometriích nástroje za konstantní řezné rychlosti 35 m/min	84
11.2.4.	Závěrečné hodnocení měření drsností	85
11.3.	OPOTŘEBENÍ NÁSTROJŮ	85
11.3.1.	Snímky jednotlivých opotřebení na destičkách.....	87
11.3.2.	Opotřebení na hřbetě.....	89
11.3.3.	Radiální opotřebení.....	91
11.3.4.	Porovnání opotřebení nástrojů při pro jednotlivé řezné rychlosti v_c	92
11.3.5.	Závěrečné hodnocení opotřebení nástrojů.....	93
11.4.	MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI DO HLOUBKY OD OBROBENÉHO POVRCHU	94
11.4.1.	Příprava vzorků	94
11.4.2.	Postup měření mikrotvrdosti	97
11.4.3.	Naměřené hodnoty mikrotvrdosti	98
11.4.4.	Závěrečné hodnocení mikrotvrdostí.....	101
11.5.	OPTICKÁ METALOGRAFIE	102
11.5.1.	Postup leptání.....	102
11.5.2.	Snímky optické metalografie	102
11.5.3.	Závěrečné hodnocení optické metalografie.....	105
11.6.	ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ	105
11.6.1.	Příprava vzorků	106
11.6.2.	Zařízení pro měření zbytkových napětí	106



11.6.3.	Postup měření.....	107
11.6.4.	Naměřené hodnoty	108
11.6.5.	Závěrečné vyhodnocení zbytkových napětí	110
11.7.	ZÁVĚR EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI	110
12.	ZÁVĚR	112
13.	BIBLIOGRAFIE	114



Seznam značek a symbolů

Značka	Název	Jednotky
v_c	Řezná rychlost	[m.min ⁻¹]
v_f	Rychlost posuvu	[m.min ⁻¹]
D	Průměr nástroje	[mm]
n	Otáčky nástroje	[min ⁻¹]
f_n	Posuv na otáčku	[mm.min ⁻¹]
z	Počet břitů nástroje	[-]
f_z	Posuv na zub	[mm.zub ⁻¹]
a_p	Tloušťka odřezávané vrstvy	[mm]
S_T	Průřez třísky	[mm ²]
K_v	Součinitel obrobitelnosti	[-]
HV	Tvrdost podle Vickerse	[-]
γ_o	Úhel čela	[°]
α	Úhel naklopení vzorku	[°]
k_z	Stupeň zpevnění	[-]
HV _z	Mikrotvrdost zpevněného materiálu	[-]
HV _o	Mikrotvrdost nezpevněného materiálu	[-]
R_m	Smluvní mez pevnosti v tahu	[N.mm ⁻²]
k	Funkce materiálových vlastností	[-]
HB	Tvrdost podle Brinella	[-]
F	Síla	[N]
HRC	Tvrdost podle Rockwella	[-]
HK	Tvrdost podle Knoop	[-]
HSC	Tvrdost podle Shoreho	[-]
h_z	Vzdálenost vtisku od povrchu	[mm]
u	Průměrná hodnota úhlopříčky	[mm]
t	Doba působení zatížení	[s]
P	P-parametr, parametr vypočítaný ze základního profilu	[-]
W	W-parametr, parametr vypočítaný z profilu vlnitosti	[-]
R	R-parametr, parametr vypočítaný z profilu drsnosti	[-]
R_p	Největší výška výstupku profilu	[μm]
R_v	Největší hloubka prohlubně profilu	[μm]
R_z	Největší výška profilu	[μm]
R_{max}	Maximální výška profilu	[μm]
R_q	Kvadratická výška profilu	[μm]
R_a	Průměrná aritmetická úchylka profilu	[μm]
R_{mr}	Podíl součtu délek materiálových přímek	[%]
	Počet bodů profilu v základní délce	[-]
λ_s	Filtr definující rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln	[-]
λ_c	filtr definující rozdíl mezi drsností a vlnitostí	[-]
λ_f	filtr rozdělující rozdíl mezi drsností a delšími složkami vln	[-]
l _t	Celkový pohyb nástroje	[mm]
l _e	Náběh přístroje na měření drsnosti	[mm]
l _m	Doběh přístroje na měření drsnosti	[mm]



Značka	Název	Jednotky
l_r	Základní délka	[mm]
l_n	Vyhodnocovaná délka	[mm]
v_T	Řezná rychlost při stanovené trvanlivosti	[m.min ⁻¹]
$P_{už}$	Užitečný výkon	[W]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	[N.mm ⁻²]
L	Délka delší úhlopříčky	[mm]
$F_x (F_c)$	Řezná síla	[N]
$F_y (F_{cn})$	Normálová síla	[N]
$F_z (F_p)$	Pasivní síla	[N]
k_c	Měrná řezná síla	[N.mm ⁻²]
Δy	Deformace vzorku	[mm]
σ, σ_n	Normálové napětí	[N.mm ⁻²]
l_1, l_2, l_3, l_p	Tloušťka vrstvy	[mm]
t	Čas odleptávání	[min; s]
ΔH	Odleptaná tloušťka	[mm]
h	Tloušťka vzorku	[mm]
σ_{zb}	Zbytkové napětí	[N.mm ⁻²]
b	Šířka leptané plochy	[mm]
a	Vetknutí	[mm]
l	Výška leptané plochy	[mm]
U	Napětí na zdroji	[V]
h	Hloubka od povrchu	[mm]
d_1, d_2	Velikost úhlopříčky vtisku	[μ m]
d	Aritmetický průměr dvou délek úhlopříček d_1, d_2	[mm]

1. Úvod

Nikl a jeho slitiny patří mezi nejpoužívanější materiály v leteckém či kosmickém průmyslu a stále častěji nachází uplatnění i v jiných odvětvích. Například v plynových turbínách, při konstrukci turbodmychadel, čerpadel, pro výrobu tlakových nádob a v neposlední řadě také v jaderných elektrárnách, kdy se za použití slitin niklu zhotovují parní generátory. Stále více se slitiny niklu používají také na výrobu kotlů spaloven odpadu. Mezi jeho hlavní přednosti patří unikátní kombinace mechanických, fyzikálních a chemických vlastností a obecná stálost za působení vnějších extrémních podmínek.

Tyto výše zmíněné vlastnosti niklových slitin ovšem vedou také ke špatné obrábělnosti a obtížnému zpracování. Z těchto důvodů je nikl a jeho slitiny řazeny mezi těžkoobrobitelné materiály. Hlavních příčiny jsou mimo jiné velmi nízká tepelná vodivost, vysoká pevnost i při velkých teplotách a sklon k zpevňování, což má za následek přehřívání nástroje a jeho rychlejší opotřebení, ve srovnání s běžně obráběnými materiály. Díky značnému ovlivňování teplotního pole mohou vznikat nepříznivé vlivy, jako jsou zbytková napětí, nežádoucí změna struktury povrchové vrstvy, vznik trhlin a podobně. Dalším faktem je i nižší Youngův modul pružnosti, a proto dochází k efektu odtlačení obráběného materiálu od místa řezu nástroje během obrábění. Tento jev přispívá ke zpevňování obráběného povrchu součásti.

Kombinace všech výše uvedených negativních a nežádoucích vlivů pak způsobuje vysoký stupeň opotřebení nástroje, nižší trvanlivost břitů a tím vyšší náklady na obrábění. Dalším faktorem zvyšujícím náklady na obrábění je nutnost použití nižších řezných podmínek. Kvůli houževnatosti musíme také dbát na správné upnutí nástroje s ohledem na co nejmenší vyložení a následnou tuhost celé soustavy. To je důležité zejména pro eliminaci chvění při obrábění. Důsledkem chvění totiž může být opět snížení trvanlivosti nástroje a zejména pak zhoršení kvality obroběného povrchu, zejména v oblasti mikrogeometrie povrchu.

Integritu povrchu můžeme obecně klasifikovat jako soubor užitečných vlastností povrchu, které ovlivňují schopnost součásti plnit správnou funkci a u kterých požadujeme, aby kvalitativně dosahovaly parametrů, jež jsme si stanovili. Integritu povrchu tvoří tedy řada složek, jejichž definováním a hodnocením jsou popsány vlastnosti povrchu. Po vyhodnocení definovaných složek dostáváme vlastnosti určující vhodnost součásti pro určité aplikace v konkrétním prostředí.



Cíle práce:

Cílem této práce je v teoretické části řešeršní činnost v oblasti niklu a jeho slitin, zejména pak slitiny Inconel 713 LC, problematika jejího třískového obrábění a následný rozbor parametrů integrity povrchu a opotřebení nástrojů. V experimentální části pak bude analýza jednotlivých parametrů obrábění, integrity povrchu a opotřebení nástrojů po čelním frézování, jejich vyhodnocení a závěry.

2. Nikl

Nikl je kujný feromagnetický kov s dobrou tažností lesklé, stříbrno-šedé barvy o hustotě 8908 kg/m³. Má dobrou svařitelnost a snadno se leští. V minulosti byl často používán jako ochrana proti korozi vzhledem k jeho dobrým korozivzdorným vlastnostem. Oproti železu má vyšší chemickou odolnost a schopnost pasivace povrchu. Je velmi citlivý na siřičité prostředí. Pro člověka je ve vyšších koncentracích toxický a občas způsobuje alergickou reakci.

Nikl se převážně využívá jako legující prvek. V ocelích zlepšuje prokalitelnost, pevnost a houževnatost za nízkých teplot. Hlavní využití niklu nalézá v korozivzdorných ocelích, kde stabilizuje austenit. Austenitické korozivzdorné oceli nejsou magnetické, mají vysokou tažnost a jsou odolné vůči vyšším teplotám. Jejich využití je mimo jiné v chemickém a potravinářském průmyslu hlavně kvůli jejich chemické odolnosti.

Nikl-chromové slitiny se využívají do zařízení, které jsou namáhány extrémními silami při vysokých teplotách (např. letecké motory, plynové turbíny, parní turbíny). Slitiny mají velmi vysokou žárupevnost i žáruvzdornost. Při zahřátí těchto slitin se jejich povrch pokrývá silnou pasivační vrstvou, která dále slouží jako ochrana proti degradaci v korozním prostředí.

Velká část světové produkce niklu v současné době putuje jako surovina do výroby elektrických článků s možností opětovného dobíjení. Nikl-kadmiové články, které se používali dříve jsou dnes nahrazeny nikl-hydridovými jako zdroj elektrické energie. Používají se například pro ruční nářadí, nebo jako náhrada za jednorázové monočlánky. [1]

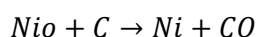
2.1. Mechanické vlastnosti niklu

Nikl dosahuje hodnoty meze kluzu kolem 148 N/mm² a meze pevnosti v tahu hodnoty 462 N/mm². Youngův modul pružnosti má nikl podobný jako ocel. Dosahuje hodnot okolo 2,04 · 10⁵ N/mm².

2.2. Výskyt niklu a jeho výroba

Předpoklad je, že nikl se nachází hluboko pod zemí. Dále se vyskytuje v dopadajících meteorech. Největším nalezištěm niklu je v Kanadě blízko města Sudbury. Zde se těží asi čtvrtina celkové světové produkce. Předpokládá se, že velikost naleziště spočívá ve velkém meteorickém zásahu do země. [2]

Získávání niklu je celkem složitý proces. Je velmi závislý na druhu rudy, ze které ho získáváme. Mezi poslední fáze můžeme zařadit získání oxidu nikelnatého, který se dále zredukuje pomocí koksu



Výsledný kov se na závěr pročišťuje pomocí elektrolýzy. [3]

3. Niklové slitiny

3.1. Nerezové oceli

Největší část vyrobeného niklu je určen pro ocelářský průmysl jako stěžejní legující prvek na výrobu korozivzdorných ocelí. Převážná většina korozivzdorných ocelí obsahuje mimo chromu i 8÷10 % niklu. Jeho maximální obsah však může být až 30 %. Nikl v ocelích funguje jako austenitotvorná složka a zvyšuje tažnost a houževnatost za nízkých teplot. Nikl dále vytváří pasivační vrstvu, která chrání povrch před oxidací a korozi. Nejrozšířenější korozivzdornou ocelí je ocel AISI 304 (Wr. Nr. 1.4301), která obsahuje 8 % niklu a 18 % chromu. [4]

3.2. Slitiny Ni – Cu

Tyto slitiny jsou také známé pod obchodními názvy MONEL nebo NECORROS. Obsahují přes 60 % niklu, kolem 30 % chromu a jednotky procent Mn a Fe. Oproti čistému niklu se vyznačují vyšší pevností, ale nižší chemickou odolností v silně alkalickém prostředí. Jsou chemicky velice stabilní a mají velkou korozivzdornost a to hlavně při styku např. s mořskou vodou, kde normální korozivzdorné oceli nestačí. Do těchto slitin je také možné přidat další legující prvky Ti a Al, které spolu s Ni vytvářejí intermetalické fáze, a ty zvyšují pevnost precipitačních částic. Rozsah pracovních teplot těchto slitin je $-10^{\circ}\text{C} \div 425^{\circ}\text{C}$. [4]

3.3. Slitiny Ni – Cr

Největší podíl těchto slitin mají nikl a chrom. Dále jsou tyto prvky doplněny o další legury. Díky kombinaci těchto kovů má slitina velice velkou odolnost proti vysokoteplotní oxidaci a schopnost zachování pevnosti i při teplotách až kolem 1000°C . Při vhodném tepelném zpracování dojde ke zmenšení počtu krystalů v kovu a to má za následek, že jsou tyto slitiny odolné vůči vysokoteplotnímu creepu. [5]

3.4. Slitiny Ni – Cr – Fe

Slitiny Ni-Cr-Fe jsou podobné jako Ni – Cr, avšak obsah niklu je částečně nahrazen železem. Substituce sice snižuje cenu slitiny, ale také snižuje užitečné vlastnosti. Tato slitina má nižší pevnost a také nižší maximální teploty využití. [5]

3.5. Slitiny s nízkou tepelnou roztažností

Existuje i další skupina slitin niklu a železa, jejich zvláštností je nízká tepelná roztažnost. Jedná se o slitiny, které umožňují kopírovat tepelnou roztažnost jiného materiálu např. skla, a umožňují tak vzájemnou těsnost spojů. Tyto materiály jsou používány např. na výrobu teplotně stabilních etalonů pro měřicí přístroje nebo formy pro výrobu kompozitních materiálů. [6]

3.6. Magnetické slitiny

Nikl také umožňuje vytvářet slitiny s velkou magnetickou permeabilitou. Velký obsah niklu je v těchto slitinách doplněn molybdenem, mědí a železem.

3.7. Termočláňkové slitiny

Už z názvu vyplývá, že tyto slitiny se používají pro termočláňky. Jejich teplotní rozsah je $300 \div 1000^\circ\text{C}$. Jejich hlavní zástupci jsou Chromel, Konstantan, Kopel a Alumen.

3.8. Žárupevné slitiny

Jedná se o Ni – Cr slitiny austenitického charakteru, které spadají do kategorie super slitin. Jsou dále legovány dalšími prvky jako třeba Co, W, V, Ni, Fe, Ta, B, Ti, Al, atp. Označení super slitiny zahrnuje skupinu materiálů s velkými pevnostmi a protikorozními vlastnostmi za zvýšených teplot. Cr – Ni slitiny mají řadu komerčních názvů. Mezi ty hlavní patří Inconel, Haynes, Nicrofer a Udimet. [7]

3.8.1. Historie žárupevných slitin

Z historie to byl letecký a kosmický průmysl, který se významně podílel na vývoji slitin niklu, neboť u tohoto průmyslu byla finanční otázka na vývoj a výrobu druhořadá. Následně se však výhodných vlastností těchto slitin začalo využívat i v průmyslu energetickém, chemickém, potravinářském a ropném.

Jednou z prvních super slitin byl Monel K 500. Další se pak objevily slitiny s označením Nimonic. Tyto slitiny měly daleko lepší vlastnosti vzhledem k preciznější technologii výroby. [3]

3.8.2. Vliv legujících prvků na vlastnosti žárupevných ocelí

- **Fe** – může z malé části nahradit chybějící nikl. Sníží se tím cena slitiny ale má negativní vliv na její žárupevnost, která značně klesá
- **Co** – zvyšuje žárupevnost, tvařitelnost a snižuje vrstvené chyby. Nevýhodou je vyšší cena slitiny
- **Cr** – zlepšuje odolnost proti tečení a plastické vlastnosti slitiny. Dále zvyšuje odolnost proti oxidaci a to i za vyšších teplot.
- **B, Zr** – zvyšují odolnost proti tečení
- **Mo, W** – zpevnění matrice
- **Al** – zvyšuje žáruvzdornost, ale snižuje mechanické vlastnosti
- **Ti, Nb, Ta, V** – tyto prvky se mohou použít jako náhrada za hliník. Výrazně nezhoršují mechanické vlastnosti, avšak zvyšují cenu [3]

4. Kontaktní měření drsnosti

4.1. Mikrogeometrie

Povrch součásti není tvořen dokonalou vnější obálkou, ale vytvořené plochy mají profil vlnitosti a drsnosti. Tyto charakteristiky se liší vlnovou délkou. Drsnost povrchu charakterizuje vzdálenost a výšku nerovností profilu povrchu. Tvar a velikost povrchových nerovností může mít výrazný vliv na vysokocyklovou zátěž, kdy menší drsnost představuje menší množství potenciálních vrubů pro šíření únavových trhlin. Naopak u některých aplikací je potřeba dodržet určitou drsnost, aby se například mezi kluznými plochami dokázal udržet olejový film. Z těchto důvodů je dodržení předepsaných drsností důležité pro správnou funkci.

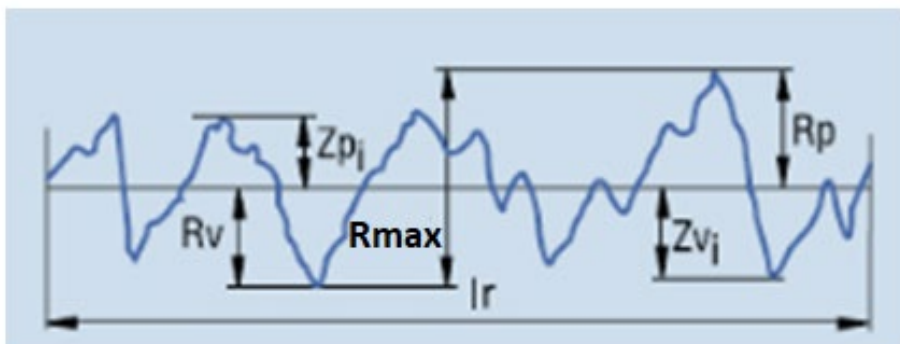
Drsnost (struktura povrchu) je soubor nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které vznikají při výrobě. Nepočítají se do ní vady povrchu. [8]

K hodnocení struktury povrchu se používají jisté normalizované parametry. Tyto parametry jsou určeny pro dvourozměrné metody měření drsnosti povrchu. Parametry se dle normy ČSN EN ISO 4287 dělí na:

- **P-parametry** – vypočítané ze základního povrchu
- **R-parametry** – vypočítané z profilu drsnosti
- **W-parametry** – vypočítané z profilu vlnitosti [8]

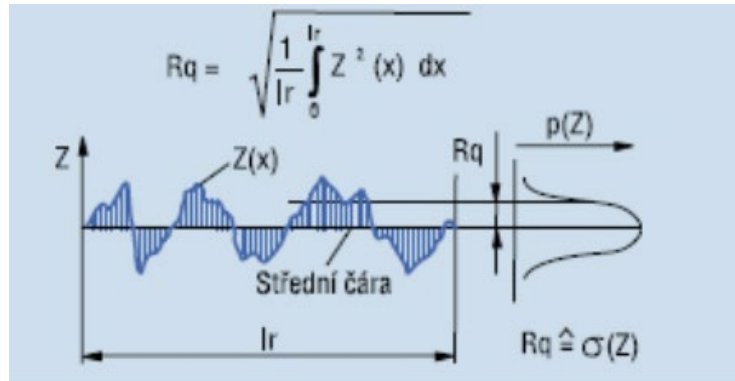
Tyto skupiny se dále dělí na celou řadu podskupin. Pro nás jsou důležité jen R-parametry a proto jsou zde uvedeny jen jejich některé základní podskupiny.

- **R_p** – Největší výška výstupku v rozsahu základní délky
- **R_v** – Největší hloubka prohlubně v rozsahu základní délky
- **R_{max}** – Největší výška profilu (součet nejvyššího výstupku a největší prohlubně)



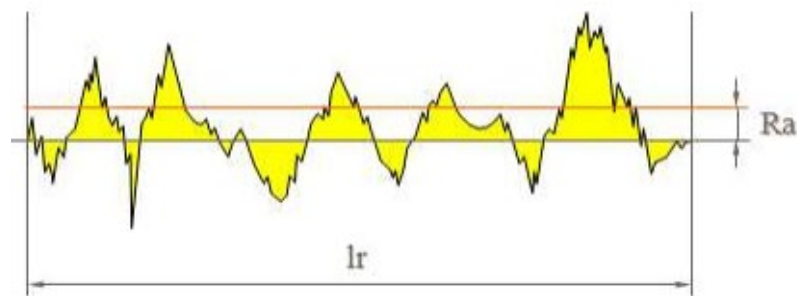
Obr. 1 – Znázornění parametrů R_p , R_v a R_{max} [9]

- **Rq** – Střední kvadratická hodnota úchylek. Tento parametr zároveň odpovídá standardní odchylce z profilových souřadnic



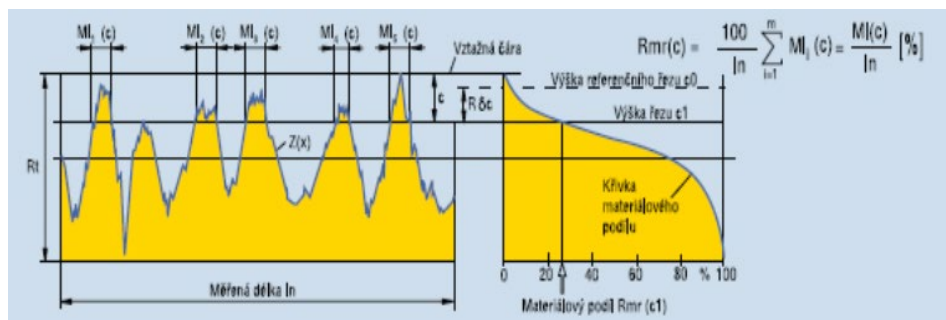
Obr. 2 – Znárodnění parametru Rq [9]

- **Ra** – průměrná úchylka posuzovaného profilu – aritmetický průměr absolutních hodnot úchylek v rozsahu základní délky



Obr. 3 – Znárodnění parametru Ra [10]

- **Rmr (c)** – procentuální podíl součtu délek materiálových přímek Ml(c) v dané výšce profilu k měřené délce lr. Křivka podílu materiálu udává podíl materiálu jako funkci hladiny řezu

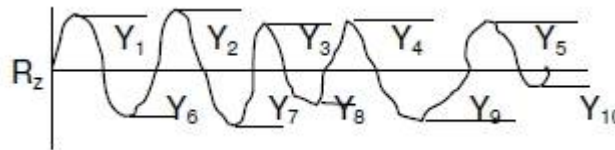


Obr. 4 – Znárodnění parametru Rmr (c) [9]

- **Rz** – Průměrná hodnota z absolutních hodnot 5 maxim a 5 minim profilu křivky.

$$Rz = (Y_1 + Y_2 + \dots + Y_{10}) / 5$$

$$(Rz = \text{asi } 4 \div 6 \times Ra)$$



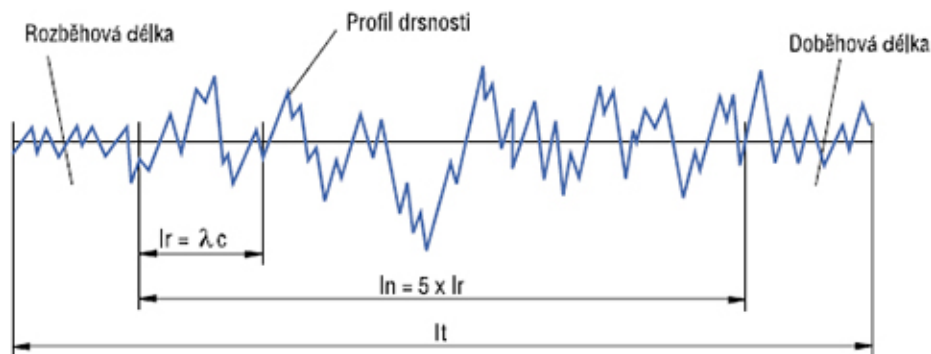
Obr. 5 – Znárodnění parametru Rz [11]

4.2. Filtrace profilu

Strukturu povrchu můžeme rozdělit dle velikosti rozteče, nejdříve ji však musíme separovat pomocí filtrace. Filtrace slouží k oddělení vlnitosti a drsnosti.

- **λs** filtr – filtr definující rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln
- **λc** filtr – filtr definující rozdíl mezi drsností a vlnitostí
- **λf** filtr – filtr rozdělující rozdíl mezi drsností a delšími složkami vln [10]

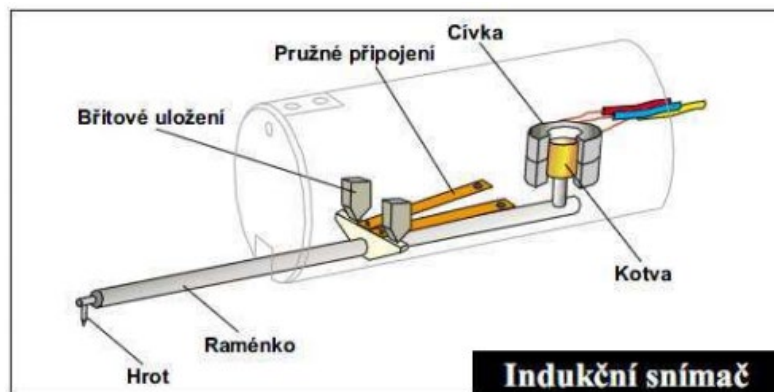
Cut-off je mezní vlnová délka filtru profilu, která charakterizuje způsob filtrace k oddělení drsnosti od vlnitosti. Celkový pohyb nástroje **lt** lze rozdělit na několik dílčích úseků. Úsek **le** je přední část měření a slouží k náběhu přístroje. Poslední úsek sloužící k doběhu je označován **lm**. Oba tyto úseky jsou rovny základní délce **lr**, která svou délkou odpovídá vlnové délce profilu **λc**. Celková délka **ln** slouží k vyhodnocení potřebných částí profilů povrchu a její velikost je rovna pětinásobku základní délky **lr**. [12]



Obr. 6 – Znárodnění délek při měření drsnosti [9]

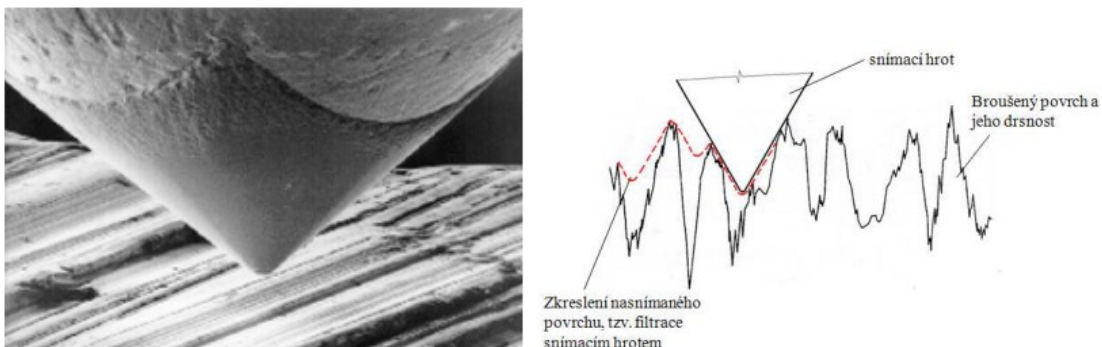
4.3. Princip kontaktního měření drsnosti

Dotkový přístroj zkoumá povrch snímacím hrotem a získává úchytky ve formě profilu povrchu. Potřebné parametry je schopen vypočítat a profil zaznamenat buď přímo přístrojem, nebo připojeným počítačem. Nerovnosti na povrchu jsou vyhodnoceny změnami výšky měřicího hrotu. Hlavními částmi dotkového profiloměru jsou: řídicí jednotka, posuvná část, zobrazovací část, indukční snímač a diamantový nebo safírový hrot. [12]



Obr. 7 – Schéma indukčního snímače [12]

Hroty bývají z diamantu s vrcholovým úhlem 90° a zaoblenou špičkou o poloměru 2, 5 nebo $10 \mu\text{m}$. Měřicí přitlačná síla je od 0,6 do 2 mN.



Obr. 8 – Diamantový měřicí hrot a ukázka snímání kontaktním způsobem [10]

4.4. Vyhodnocení měření drsnosti

Charakteristiky drsnosti, zvláště parametry vertikální R_q , R_z a R_a se pohybují v rozmezí od -20 % do +30 %. Jedna samostatně naměřená hodnota nemůže dávat nikterak přesnou výpověď o respektování tolerovaných parametrů. V normě ČSN EN ISO 4288 příloze A je tato skutečnost upřesněna:

- Pravidlo maxima – Povrch odpovídá požadavku maxima, jestliže žádná z naměřených hodnot nepřesáhne předepsanou hodnotu horní meze
- Pravidlo 16 % – Povrch je v pořádku, pokud ze všech měření 16 % a méně přesahuje předepsanou horní mez. [13]

4.5. Postup měření

- Vizuálně se odhadne neznámý parametr profilu drsnosti
- Pro odhadnutý parametr se určí dle normy hodnoty I_r
- Získá se hodnota žádaného parametru (měření)
- Vyhodnotí se naměřená data dle zvoleného pravidla [10]

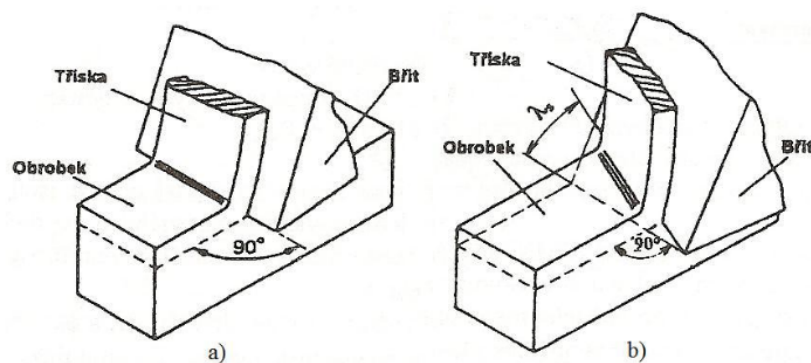
Tab. 1 – Základní délky l_r pro měření [10]

Ra (μm)	Základní délka l_r (mm)	Vyhodnocovaná délka l_n (mm)
(0,006; 0,02>	0,08	0,4
(0,02; 0,1>	0,25	1,25
(0,1; 2>	0,8	4
(2; 10>	2,5	12,5
(10;80>	8	40

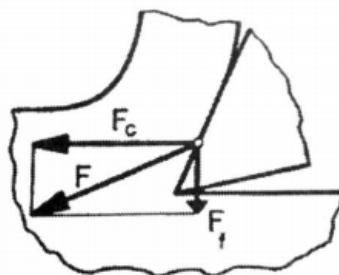
5. Měření sil

5.1. Síly při řezání

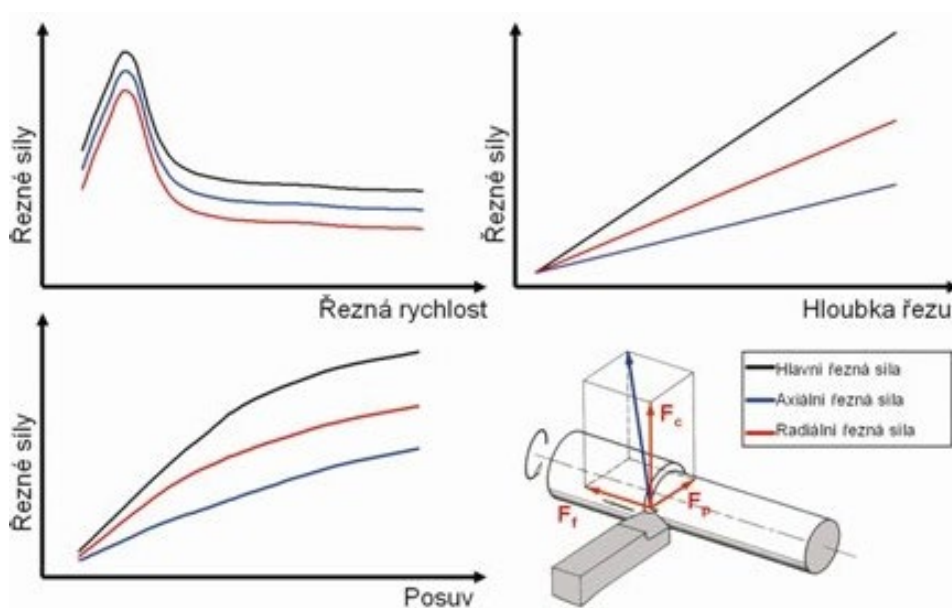
Řezné síly jsou různé během ortogonálního (volného) a vázaného řezání. Během volného je ostří kolmé na směr řezného pohybu a řezné síly působí pouze v rovině. Tento způsob najdeme např. u frézování s přímými zuby, zapichování, hoblování, protahování, aj. Výsledná síla F může být rozložena na řeznou sílu F_c a sílu posuvu F_f . Vázané řezání, které se objevuje třeba u podélného soustružení, vrtání nebo frézování s šikmými zuby, způsobuje síly v prostoru. Zde můžeme výslednou sílu F rozložit na řeznou sílu F_c a sílu posuvu F_f a pasivní sílu F_p . [14] [15]


Obr. 9 – Řezný proces, a) volné řezání, b) vázané řezání [16]

Řezná síla F_c je největší ze všech složek. Na celkovém příkonu řezného procesu se podílí až z 99 %. Řezné síly se mění s řeznými podmínkami. Síly lze měřit dvěma způsoby – přímým a nepřímým. [14]



Obr. 10 – Síly při ortogonálním řezání [17]



Obr. 11 – Řezné síly při vázaném řezání a jejich změny při změnách řezných podmínek [18]

5.2. Nepřímé měření sil při obrábění

Nepřímá metoda měření sil spočívá ve sledování reakce obráběcího stroje. Nejčastěji vychází z měření výkonu elektromotoru, který se mění v závislosti na velikosti zatěžujících sil. Ze vztahu pro užitný výkon

$$P_{už} = F_c \cdot v_c$$

Kde $P_{už}$ je řezný výkon
 F_c řezná složka síly
 v_c řezná rychlost

vyplývá, že touto metodou lze zjistit jen řeznou složku síly. Pro měření výkonu se používají wattmetry. Pro určení $P_{už}$ musíme nejdříve zjistit výkon chodu stroje na prázdko a následně tuto hodnotu odečteme od změřeného výkonu při zatížení. Tato metoda je sice relativně jednoduchá a nepotřebuje žádnou speciální měřicí techniku. Praxe nám však ukazuje, že není moc přesná a dává nám spíše orientační hodnoty. Hlavním důvodem je rozdílná účinnost elektromotoru při různém zatížení. [14] [19]

Další možností nepřímé metody měření je stanovení tangenciální složky řezné síly pomocí kroutícího momentu. Jedná se o metodu, která také vychází z měření výkonu stroje. Výkon se změří při zatížení a zapíše se hodnota. Následně se při stejných otáčkách působí na vřeteno mechanickou brzdou tak, aby se dosáhlo stejného výkonu jako při zatížení. Na tuto metodu nemají vliv rozdílné účinnosti stroje, ale přesnost ovlivňuje proměnlivost součinitele tření. Metoda se využívá méně.

5.3. Přímé měření sil při obrábění

Síly lze také měřit přímo pomocí dynamometrů. Dynamometry pracují na principu měření pružné deformace v soustavě stroj – nástroj – obrobek během samotného obrábění. Dynamometry musí zaručit nezávislost měřící veličiny na provozních vlastnostech přístroje. Je od nich požadována maximální přesnost a schopnost měřit požadovaný rozsah. Dále musí zaručit stálost naměřených hodnot a jejich opakovatelnost.

Z těchto potřebných charakteristik plynou požadavky na dynamometry:

- Tuhost – je dána velikostí zatěžující síly
- Citlivost – souvisí s tuhostí dynamometru
- Stálost údajů – je závislá na tuhosti, citlivosti a přesnosti od stanovení nulové polohy až po zachycení údajů
- Setrvačnost – přímo závisí na hmotnosti soustavy

Aparatura se skládá ze tří částí:

- Pružný člen – přebírá vnější zatížení a překonává změny
- Snímač – Mění mechanickou veličinu pružného členu na analogický parametr
- Přijímač – zesiluje a zpracovává signál ze snímače [20] [21]

5.4. Dynamometry

Dynamometrů je možné rozdělit dvěma způsoby. Jedna možnost je rozdělení na dynamometry s pružným členem a bez pružného členu a nebo je možné dělit na dynamometry mechanické a elektrické.



Obr. 12 – základní rozdělení dynamometrických měřidel [22]

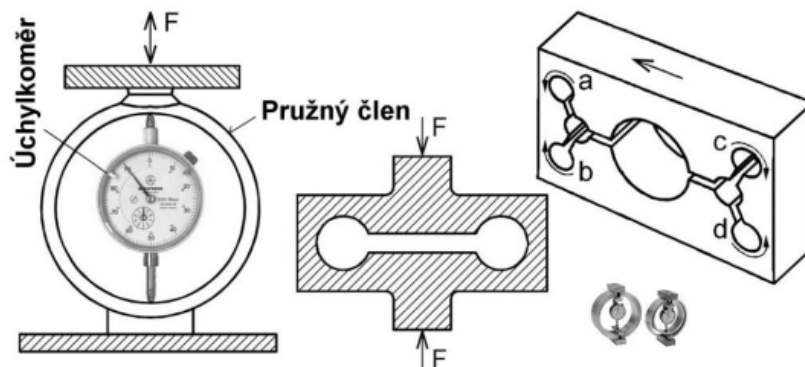
5.4.1. Dynamometry s pružným členem

Při zatížení elastického členu dochází k jeho deformaci. Tato deformace je změřena příslušným zařízením a převedena na výslednou hodnotu silového zatížení. Tvary pružných členů jsou různé a závisí na celé řadě faktorů jako například požadovaný rozsah, požadovaná citlivost, rozměrové limity, výrobní náklady, a jiné. Elastické elementy jsou zpravidla vyráběny z nástrojové oceli. [22]

Mechanický dynamometr

Jedná se o nejjednodušší z dynamometrů. Používá se především pro cejchování ostatní dynamometrů, protože u nich lze vyloučit nežádoucí rušivé vlivy. Jejich výhoda také spočívá v jejich naprostou linearitou mezi zatěžující silou a naměřenými údaji, danou především Hookovým zákonem. Zatěžovací síly zde působí přímo, nebo jsou znásobeny mechanickým převodem na měřící element (např. číselníkový úchylkoměr) [20]

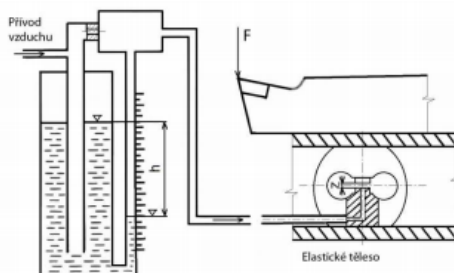
O velikosti síly se usuzuje z deformace pružin, membrán, kroužků, třmenů atp. Hlavními představiteli jsou dynamometry třmenové a prstencové. Nevýhodou mechanických dynamometrů je závislost na teplotě, obtížná změna rozsahu, únava materiálu a velká setrvačnost. [21]



Obr. 13 – Mechanické dynamometry [23]

Pneumatické dynamometry

Princip je založený na dynamických vlastnostech vzduchu, kdy zatěžující síla působící na jedné straně pístu je vyvažována z druhé strany tlakem vzduchu. Snímání protitlaku je zajištěno manometrem. Předností je snadná obsluha, údržba, vysoká spolehlivost a citlivost.

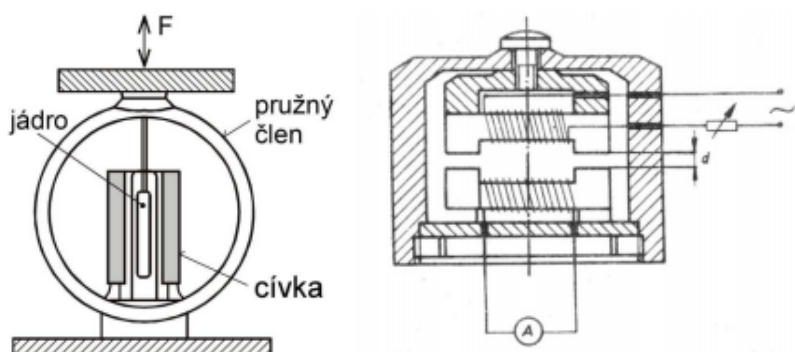


Obr. 14 – Princip pneumatického dynamometru [22]

Indukční dynamometry

U indukčních dynamometrů dochází působením měřené síly ke změně indukčnosti pohybem jádra v cívce, jenž je přenášen z pružného členu. Změna indukčnosti cívky pak odpovídá danému silovému zatížení. [22]

Další varianta je, že zatěžující silou se mění šířka vzduchové mezery. Tím se mění impedance magnetického obvodu a to má za následek, že se mění i indukčnost cívky. [21]



Obr. 15 – Indukční dynamometry – s pohyblivým jádrem [23], se změnou šířky vzduchové mezery [20]

Kapacitní dynamometry

Jedná se o snímač, který využívá kapacitní senzor pro snímání deformací pružného elementu. Nejjednodušším kapacitním snímačem je deskový kondenzátor. Desky kondenzátoru jsou uloženy proti sobě a oddělené dielektrikem. Deformací tohoto elementu dochází ke změně vzdálenosti desek a tím i ke změně kapacity. [22]

Kapacitní snímače mají dostatečně velkou citlivost a malou hmotnost. Jsou však zároveň velmi citlivé na okolní vlivy a velmi náročné na měřicí techniku a údržbu. Z těchto důvodů je jejich používání omezené. [21]

Tenzometrické dynamometry

Jedná se o snímače vhodné pro velmi přesné měření dynamického zatížení. Základním principem je měření změny elektrického odporu v závislosti na elastické deformaci kovových vláken tenzometru. Nejpoužívanějším odporovým materiálem u kovových tenzometrů je konstantan (slitina Cu-Ni) s velkým měrným odporem a součinitelem deformační citlivosti $k = 2$. Podle technologie výroby se dělí na drátkové a fóliové [20] [22]

Odporové dráty nebo fólie se nalepí na namáhané těleso pomocí tmelu na bázi epoxidové pryskyřice a jsou zapojeny do můstkových obvodů. Deformací namáhaného tělesa se deformuje i odporový drát, popřípadě fólie, a to má za následek změnu elektrického odporu. [23]

V průběhu let byly vyvinuty vedle kovových tenzometrů také tenzometry polovodičové. Podstatou polovodičových tenzometrů je využití piezoelektrických vlastností některých materiálů. [20]



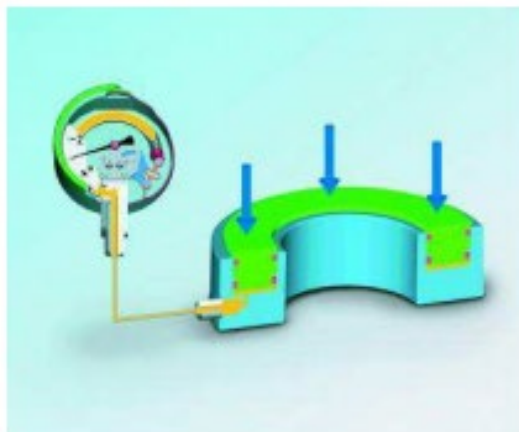
Obr. 16 – Tenzometrické měření sil na mostové konstrukci [23]

5.4.2. Dynamometry bez pružného členu

Nepřítomností pružného členu nedochází ke zkreslení sledovaných hodnot, a proto lze tvrdit, že tyto snímače jsou přesnější

Hydraulický dynamometr

Tento přístroj využívá jednoduchého principu měření tlaku manometrem. Měřená síla působí na píst nebo membránu, jenž svým pohybem způsobuje změnu tlaku v kapalině. Tato změna je následně měřena právě manometrem. Výhoda hydraulických dynamometrů je jednoduchá konstrukce a fakt, že není potřeba externí napájení a v případě analogového manometru ani žádnou elektroniku. Nevýhoda je nízká citlivost a požadavky na dokonalé utěsnění. Vzhledem k velké setrvačnosti se nedá použít na dynamické měření. [21]

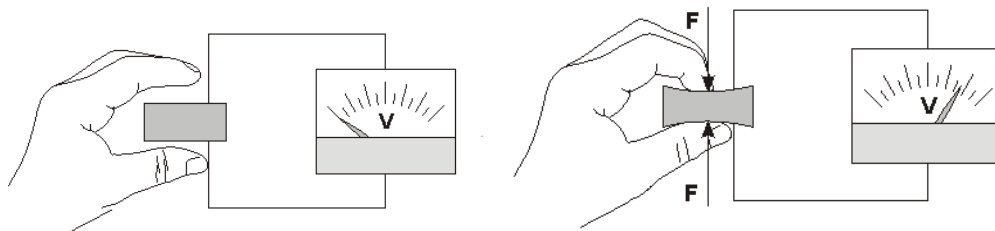


Obr. 17 – Schéma měření hydraulickým dynamometrem [22]

Piezelektrický dynamometr

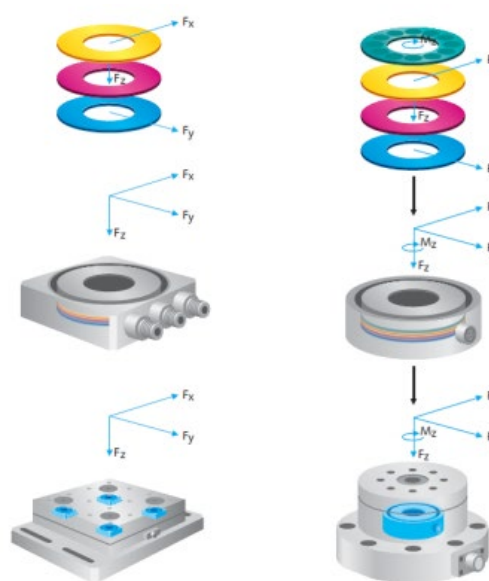
Jedná se o dynamometry, které patří k nejrozšířenějším. Často jsou považovány za nejkvalitnější zařízení. Ke snímání působící síly je využívání piezelektrických jevů, který je charakterizován vznikem elektrického náboje na povrchu některých krystalů při mechanickém zatížení. Mezi nejpoužívanější materiály patří křemen (SiO_2), materiály na bázi titaničitanu barnatého, Seignettovy soli atp. Základem snímače pro piezelektrické dynamometry je vyříznutá měřicí destička z příslušného materiálu. Při zatížení je velikost náboje přímo úměrná velikosti síly a s poklesem síly se takřka náboj lineárně snižuje. [20]

Konstrukčně jsou tyto dynamometry řešeny tak, že tělo snímače je z korozivzdorné oceli, do které jsou vloženy výbrusy z piezelektrického materiálu. Každý tento prvek pak měří jednotlivou složku silového zatížení v závislosti na piezelektrické orientaci. Dle množství výbrusů ve snímači pak dělíme dynamometry na jednokomponentní (měřící jednu složku zatížení) a vícekomponentní (měřící více složek zatížení, např. osově síly). [22]



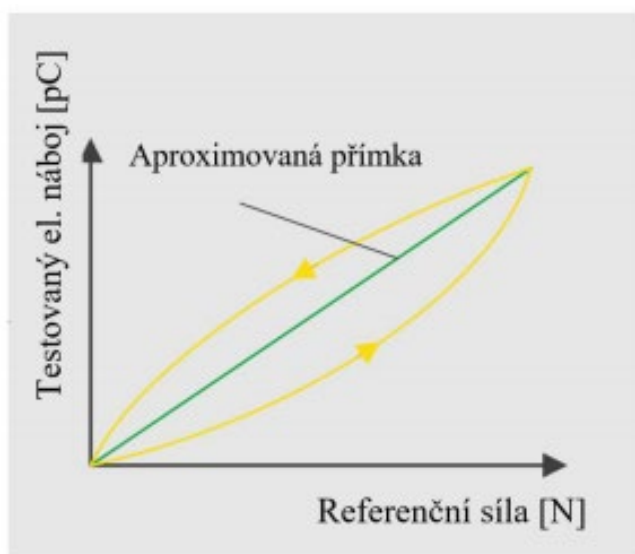
Obr. 18 – Vznik napětí při piezoelektrickém jevu [22]

Pro obrábění jsou obvykle používány dynamometry, které umožňují snímat zatěžující síly ve všech třech osách. Jedná se o vícekomponentní dynamometr, díky kterému můžeme měřit ve všech třech osách najednou, nebo třeba zatěžující sílu v jedné ose a kroutící moment kolem této osy. [23] [24]



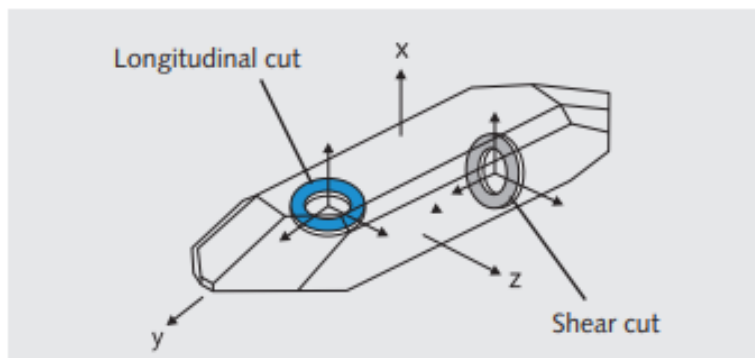
Obr. 19 – Konstrukce tříosložkového a čtyřosložkového piezoelektrického dynamometru [25]

Piezoelektrický jev není zcela lineární. Jeho linearitu zajišťuje pouze vhodná aproximace skutečných naměřených hodnot, jak je znázorněno na obr. 20.



Obr. 20 – Skutečný průběh náboje v závislosti na zatěžující síle [26]

Většina piezoelektrických snímačů pracuje s měřicím prvkem ve tvaru disku, který je získán vyříznutím z krystalu. Podle toho, zda chceme měřit zatížení tlakové či smykové, se mění úhel vyřezávání disků z krystalu. Pro tahové a tlakové síly se vyřezávají disky podélně, zatím co pro smykové zatížení se získávají z krystalu disky z příčného řezu viz obr. 21. [24] [26]



Obr. 21 – Možné řezy disků z krystalu [24]

Významným výrobcem piezoelektrických dynamometrů je firma Kistler Group. Má velké portfolio v oblasti senzorů a různých modifikací těchto dynamometrů. Firma používá přístroje univerzální, nebo zcela specifické.

6. Charakteristika technologie frézování

Frézování je jedna z nejrozšířenějších metod obrábění. Jeho výhodou je velká výkonnost při velké kvalitě obrábění. Tato metoda je využívána pro výrobu rovinných, rotačních i tvarových ploch. [20]

Frézování je obráběcí metoda, při které je materiál odebírán břity rotujícího nástroje. Posuv nejčastěji koná obrobek ve směru kolmém k ose nástroje. U modernějších strojů jsou posuvy plynule měnitelné a lze je realizovat ve všech osách najednou. Řezný proces je přerušovaný, neboť každý zub frézy odřezává krátké třísky proměnné tloušťky.

Řezné podmínky jsou definovány řeznou rychlostí, hloubkou řezu a posuvem na zub, popř. na otáčku.

Řezná rychlost

Hlavní pohyb koná nástroj, přičemž tento je definován řeznou rychlostí v_c [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$] a vypočítá se ze vztahu:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}$$

kde: n [min^{-1}] – otáčky nástroje (frézy)

D [mm] – průměr nástroje (frézy)

Vedlejší pohyb, který koná obrobek je závislý na druhu frézy a je definován posuvovou rychlostí v_f [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$], která se vypočítá ze vztahu:

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n$$

kde: f_z [mm] – posuv na zub
 z [-] – počet zubů frézy
 n [min^{-1}] – otáčky nástroje (frézy)

Posuv na zub

Posuv na zub f_z [mm] je základní jednotkou posuvového pohybu. Je to délka dráhy, kterou obrobek urazí za jeden zub.

Obdobně se tento pohyb dá určit i posuvem na otáčku f_n [mm], který je definován jako délka, kterou obrobek urazí za jednu otáčku nástroje. Mezi těmito veličinami platí jednoduchý vztah:

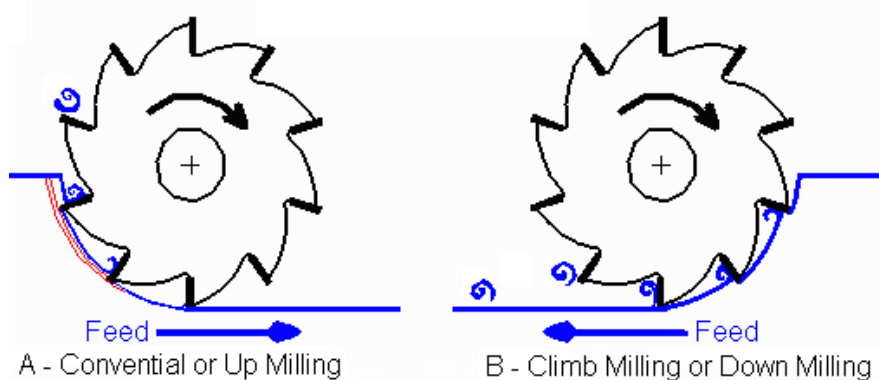
$$f_n = f_z \cdot z$$

kde: z [-] – počet zubů frézy

Hloubka řezu

Hloubka řezu a_p je tloušťka materiálu, kterou odebereme při jedné dráze frézy. Obvykle se volí v závislosti na to, zda hrubujeme, nebo obrábíme na čisto. Při hrubování je hloubka řezu 3 až 10 mm a při obrábění na čisto kolem 1 mm. [27] [22] [23]

Podle použití nástroje lze z technologického hlediska rozlišovat frézování obvodem nástroje neboli válcové frézování, a nebo čelem nástroje, nazývané čelní. Od těchto základních způsobů se občas odvozují další způsoby. Jedná se o frézování okružní a planetové. Válcové frézování se dále dělí na sousledné a nesousledné. [28]



Obr. 22 – Válcové frézování: a) nesousledné, b) sousledné [29]

6.1. Nesousledné frézování

Podstatou nesousledného frézování je, že smysl rotace nástroje je proti směru posuvu obrobku (obr. 22 A). Obrobená plocha vzniká vnikáním nástroje do obrobku. Tloušťka třísky se postupně mění z nulové hodnoty až na hodnotu jejího maxima. Řezná síla má složku, která

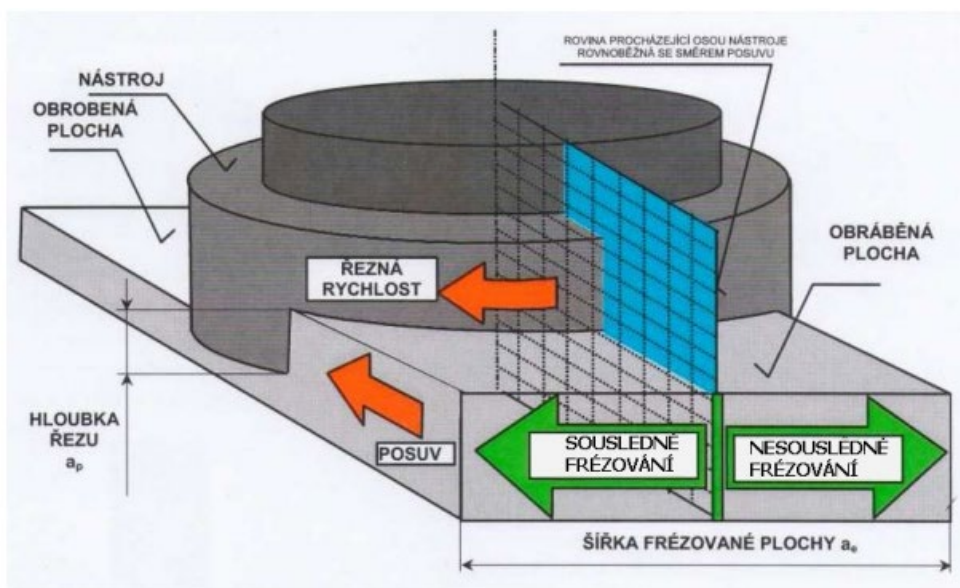
působí ve směru nahoru a odtahuje obrobek od stolu stroje. Výhodou tohoto způsobu frézování je, že trvanlivost nástroje nezávisí na povrchu obrobku, není potřeba vymezování vůlí mezi posuvovým šroubem a maticí stolu stroje a jejich menší opotřebení. [28] [30]

6.2. Sousledné frézování

Při sousledném frézování je smysl rotace nástroje ve směru posuvu obrobku (obr. 23 B). Největší tloušťka třísky je při vnikání zubu do obrobku. Obrobené plocha se vytváří, když zub vychází ze záběru. Řezné síly působí směrem dolů a přitlačuje obrobek ke stolu stroje. Tento způsob frézování může probíhat pouze na strojích, které mají vymezenou vůli a předpětí mezi pohybovým šroubem a maticí stolu. Jinak by mohlo docházet k nestejnomyšlnému posuvu, což by mohlo mít za následek poškození nástroje nebo stroje. K výhodám sousledného frézování patří menší potřebný výkon, menší sklon ke kmitání, menší sklon k tvoření nárůstku, vyšší trvanlivost břitů a lepší kvalita obrobeného povrchu. [28] [30]

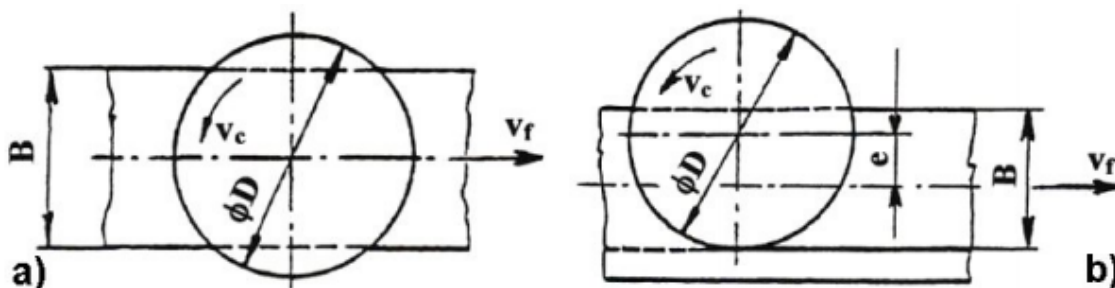
6.3. Čelní frézování

Při čelním frézování je osa kolmá na obráběnou plochu. Hloubka řezu se nastavuje ve směru osy nástroje. U čelního frézování se obrábí především čelem nástroje. Z obr. 23 je patrné, že při čelním frézování se obrábí sousledně i nesousledně současně. [17]



Obr. 23 – Čelní frézování [27]

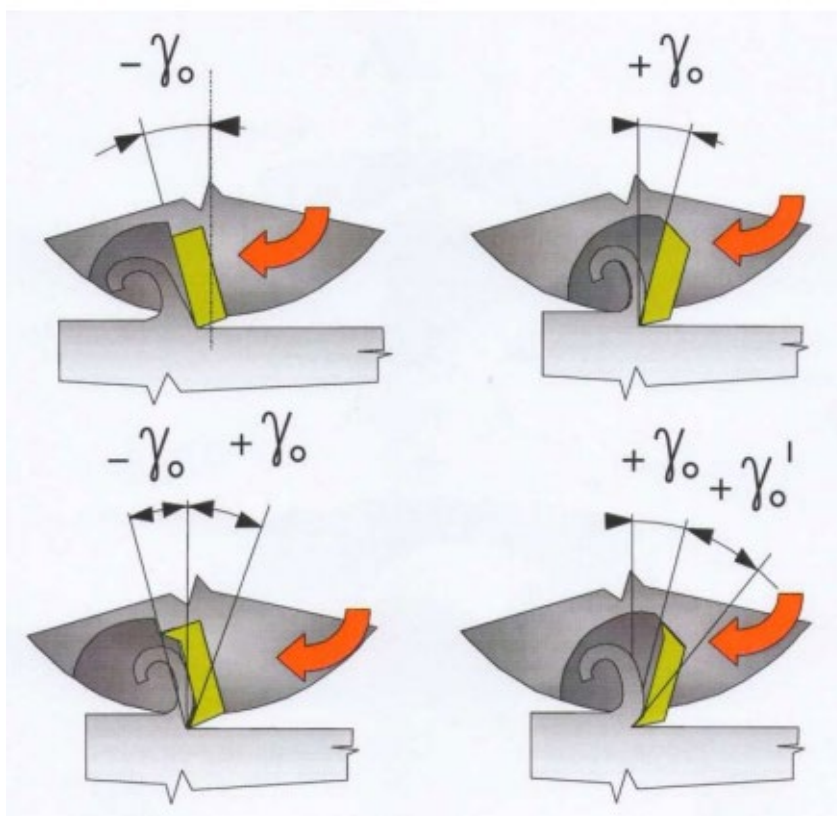
Nástroj pro čelní frézování má břity po obvodu i na čele frézy, podle polohy osy frézy vzhledem k obráběné ploše existují dvě metody. Jedná se o symetrické frézování, kdy osa frézy prochází středem frézované plochy a nesymetrické frézování, kdy je osa mimo střed frézované plochy. [17]



Obr. 24 – Čelní frézování: a) symetrické, b) nesymetrické [28]

6.4. Geometrie frézovacích nástrojů s vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD)

Geometrie fréz s VBD může být negativní, pozitivní nebo pozitivně negativní. Každé nastavení úhlu λ_0 má své opodstatnění a vhodnost použití. Výsledná geometrie je součtem úhlu na držáku a samotné břitové destičce. Jednotlivé možnosti výsledných úhlů λ_0 na frézách s VBD je znázorněno níže na obr. 25.



Obr. 25 – Možnosti úhlů λ_0 na frézách s VBD [31]

7. Obrobitelnost

Obrobitelnost je technologický soubor vlastností daného materiálu, který charakterizuje jeho vhodnost k obrábění. Zahrnuje vliv mechanických, fyzikálních a chemických vlastností materiálu, jeho chemické složení, tepelné zpracování, struktury a způsob výroby polotovaru. Obrobitelnost nelze vztáhnout pouze na obráběný materiál, ale musí se do ní zahrnout materiál řezného nástroje, vzájemná interakce mezi obrobkem a nástrojem, způsob obrábění a řezné podmínky. [32]

Obrobitelnost je v technologii obrábění velmi rozšířený výraz. Jedná se totiž o systémovou vlastnost, která vyjadřuje efektivnost obrábění při nízkých nákladech za daných technologických podmínek. Ačkoliv je obrobitelnost ovlivněna celou řadou faktorů, obvykle hovoříme o obrobitelnosti jako o vlastnosti materiálu.

Pro posouzení obrobitelnosti lze využít několika kvantitativních měřítek: index, životnost nástroje, kvalita povrchu při standardizovaných řezných podmínkách a další měřítka, jako jsou řezné síly a výkon, teplota, utváření třísky, aspekty životního prostředí atp. [33]

7.1. Značení obrobitelnosti materiálů

Pokud je obrobitelnost posuzována hodnotou v_T , jedná se prakticky o vyhodnocování úběru obráběného materiálu (velikost objemu materiálu odebraná za jednotku času) pomocí daného nástroje při smluveném konstantním průřezu třísky (např. pro podélné soustružení: hloubka třísky $a_p = 2$ mm, posuv na otáčku $f_n = 0,2$ mm), v daném řezném prostředí. Pro potřeby vyhodnocování obrobitelnosti jsou technické konstrukční materiály rozděleny do devíti základních skupin, označovaných malými písmeny:

- a – litiny
- b – oceli
- c – těžké neželezné kovy (měď a slitiny mědi)
- d – lehké neželezné kovy (hliník a slitiny hliníku)
- e – plastické hmoty
- f – přírodní nerostné hmoty
- g – vrstvené hmoty
- v – tvrzené litiny pro výrobu válců

V jednotlivých skupinách je vždy vybrán jeden konkrétní materiál, který slouží jako etalon obrobitelnosti a ve vztahu k tomuto materiálu je pak stanovována relativní obrobitelnost všech ostatních materiálů celé skupiny.

Třídy jsou označovány číslem umístěným před písmeno, které určuje danou skupinu materiálů (např. 11a. 14b. atd.). Odstupňování střední hodnoty indexu obrobitelnosti

v jednotlivých třídách je dáno geometrickou řadou s kvocientem $q = 101/10 = 1,26$ (třída referenčního (etalonového) materiálu má hodnotu $q = 1$, což znamená, že hodnota řezné rychlosti v_c v dané třídě je vždy 1,26x vyšší (nižší), než hodnota v_c v sousední třídě.

Materiály v třídách s nižším číslem, než má třída referenčního (etalonového) materiálu mají horší obrobiteľnosť než referenční (etalonový) materiál. Materiály v třídách s vyšším číslem mají lepší obrobiteľnosť.

Relativně nejhorší obrobiteľnosť v dané skupině má vždy materiál zařazený do třídy s nejnižším číslem. Nejlepší obrobiteľnosť má materiál zařazený do třídy s nejvyšším číslem. Příklad dělení skupiny oceli na třídy, včetně hodnot K_v je uveden v tab. 2. Obrobiteľnosť, jak již bylo uvedeno, je především vlastností obráběného materiálu. Přesto však musí být posuzována v úzké souvislosti s řezivostí nástroje (nástrojového materiálu), který je zvolen a použit pro zkoušky obrobiteľnosti. [32]

Tab. 2 - Hodnoty součinitele (indexu) obrobiteľnosti K_v pro jednotlivé třídy skupiny ocelí [34]

Třída	K_v			Třída	K_v		
	vyjádřeno kvocientem	střední hodnot	rozsah		vyjádřeno kvocientem	střední hodnot	rozsah
1b	$1,26^{-13}$	0,050	0,045-0,054	11b	$1,26^{-3}$	0,50	0,45-0,56
2b	$1,26^{-12}$	0,065	0,055-0,069	12b	$1,26^{-2}$	0,63	0,57-0,71
3b	$1,26^{-11}$	0,080	0,070-0,089	13b	$1,26^{-1}$	0,80	0,72-0,89
4b	$1,26^{-10}$	0,10	0,09-0,11	14b	$1,26^0$	1,00	0,90-1,12
5b	$1,26^{-9}$	0,13	0,12-0,14	15b	$1,26^1$	1,26	1,13-1,41
6b	$1,26^{-8}$	0,16	0,15-0,17	16b	$1,26^2$	1,59	1,42-1,78
7b	$1,26^{-7}$	0,20	0,18-0,22	17b	$1,26^3$	2,00	1,79-2,24
8b	$1,26^{-6}$	0,25	0,23-0,28	18b	$1,26^4$	2,50	2,25-2,82
9b	$1,26^{-5}$	0,32	0,29-0,35	19b	$1,26^5$	3,15	2,83-3,55
10b	$1,26^{-4}$	0,40	0,36-0,44	20b	$1,26^6$	4,00	3,56-4,47

Podle normy je pro ocel doporučován pouze jeden etalonový materiál, a to ocel 12 050.1. Na základě praktických zkušeností se ukazuje, že by bylo vhodné využívat pro každou třídu obrobiteľnosti jiný referenční materiál. Doporučené materiály etalonů, druhů používaných nástrojů a doporučených řezných podmínek uvádí následující tabulky.

Tab. 3 - Doporučené nástroje pro zkoušky obrobiteľnosti [34]

Metoda obrábění	Doporučené nástroje
Soustružení	VBD typu SNGN 120408 nebo SPGN 120408, SK P20, průřez držáku 25x25 mm, úhel $\chi_r = 70^\circ$ (PN223850.1 nebo PN223850.2).
Vrtání	Vrták \varnothing 10 mm, ČSN 221140, strojní ostření s tolerancí délky ostří 0,2 mm. Pro vrtáky se slinutým karbidem doporučen druh K10.
Frézování	Frézovací hlava PN 222462.15 nebo PN 222462.25 o průměru 125 mm, počet zubů 10. Po upnutí destiček je dovolené maximální házení axiální 0,03 mm, házení radiální 0,05 mm.

Tab. 4 - Doporučené řezné podmínky pro zkoušky obrobiteľnosti [34]

Metoda obrábění	Řezné podmínky		
	Řezná rychlost (m.min ⁻¹)	Posuv (mm)	Hloubka řezu (mm)
Soustružení	80, 100, 125	0,25	2,0
VBD z SK	160, 200, 250		
Vrtání RO	12, 18, 24, 30, 35	0,12	3 D
Vrtání SK	28, 36, 44, 52, 60	0,08	2 D
Frézování	80, 110, 139	$f_z = 0,1$ mm	2
VBD z SK	176, 220, 278		šířka fréz. 0,5 D

Stupeň obrobiteľnosti určitého materiálu je zpravidla různý při obrábění odlišnými metodami. Proto je třeba zkoušky obrobiteľnosti provádět pro jednotlivé způsoby obrábění zvlášť. Z hlediska provádění rozlišujeme zkoušky dlouhodobé a krátkodobé. Dále se dají rozdělit na metody přímé a nepřímé. U přímých metod se bezprostředně stanoví hodnota řezné rychlosti pro zvolenou trvanlivost.

Obrobiteľnosti niklových slitin nejsou zavedeny tak precizně jako u ocelí nebo hliníkových slitin. U niklových slitin kvantifikována není, a to hlavně vzhledem k potřebě využití jiných materiálů než nepovlakovaných slinutých karbidů a u těch zatím nedošlo k žádné standardizaci testů.

Obrobiteľnost lze kvalifikovat jako dobrou při splnění jednoho či více z následujících kritérií: obrábění s minimálními energetickými požadavky, minimální opotřebení nástroje (jeho maximální životnosti), minimální řezné síly, eliminace problémů s utvářením a odvodem třísek, dobrá kvalita povrchu na obrobené ploše atd. Jinými slovy lze říct: dobrá obrobiteľnost představuje co nejchopodárnější výrobu za daných technologických podmínek.

8. Obrábění niklových slitin

Vysoko pevnostní niklové slitiny představují významný problém při obrábění. Základní materiálové vlastnosti jako pevnost kolem 1800 N/mm^2 již nejsou překážkou pro třískové obrábění s definovanou geometrií. V kombinaci s dalšími specifickými vlastnostmi některých niklových slitin ovšem výrazně komplikují práci. Niklové slitiny mají schopnost si udržet pevnost do vyšších teplot, mezi 600 až 1000°C , na rozdíl konvenčních materiálů a nedochází u nich k tak velkému poklesu řezného odporu se zvyšující se řeznou rychlostí. Další komplikací představuje nižší tepelná vodivost, která brání třískám přijímat více tepla a způsobuje vyšší tepelné zatížení nástroje. Standardně jsou tak výrobci nástrojů doporučovány až řádově nižší řezné rychlosti než pro obrábění ocelí. [35]

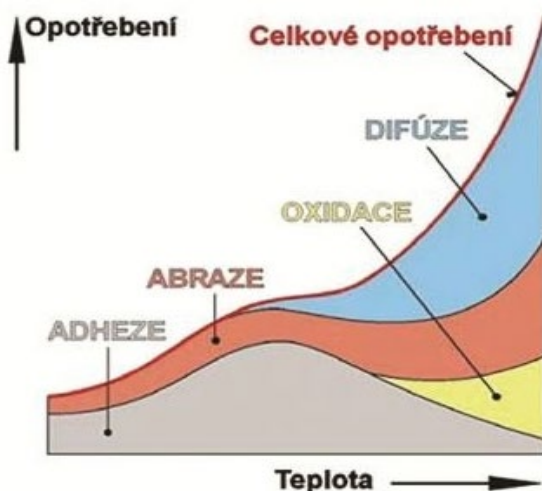
Dalšími vlastnostmi, které snižují trvanlivost nástrojů jsou přítomnost tvrdých částic v precipitačně vytvrditelných slitinách, které zvyšují opotřebení nástroje, a deformační zpevnění. [36]

8.1. Opotřebení nástroje

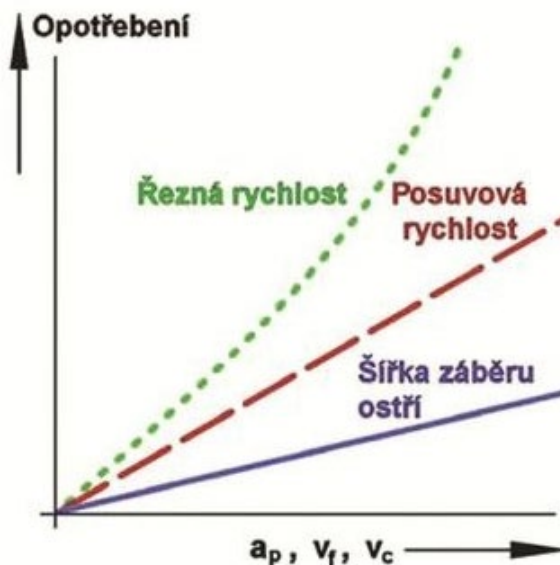
Trvanlivost nástroje je závislá hlavně na charakteru jeho mechanického a tepelného namáhání. Při obrábění slitin niklu je tepelné i mechanické namáhání značné, a proto se při obrábění slitin niklu dochází ke značnému opotřebení nástrojů.

Druhy opotřebení jsou především tyto:

- 1) Abrazivní otěr
- 2) Difuzní opotřebení
- 3) Adhezní otěr
- 4) Plastická deformace
- 5) Křehký lom



Obr. 26 - Závislost forem opotřebení břitu řezného nástroje na teplotě v řezu [33]



Obr. 27 – Vliv řezných podmínek na opotřebení břitu řezného nástroje

Do výsledného opotřebení patří také vymílání, které je způsobeno difúzí a mechanickým otěrem třísek. V čelní ploše se vyhloubí žlábek za břitem, který oslabí pevnost samotného břitu a tím se zvýší se nebezpečí vylamování hrany ostří. Opotřebení a vylamování břitu může být způsobeno rázovým namáháním při přerušovaném řezu a projeví se zhoršením kvality obrobene plochy a zvětšením řezné síly. Zlomení břitu může být způsobeno nepřiměřeným namáháním (u křehkého materiálu).

Z hlediska technologie obrábění je obrobitelnost jednou z nejdůležitějších vlastností materiálu a lze ji také definovat jako míru schopnosti daného konkrétního materiálu být zpracováván některou z metod obrábění. Je hlavním činitelem pro volbu řezných podmínek a pro funkci nástroje při všech metodách obrábění.

8.1.1. Abrazivní otěr

Abrazivní otěr vzniká působením tvrdých částic, které se nacházejí v materiálech obrobků. Vlivem těchto částic se oddělují částice z funkčního povrchu nástroje, kde dochází k vydírání materiálu a rýhování. Jedná se o nejčastější mechanismus opotřebení. Vzniká hlavně za nižších řezných rychlostech, při kterých se materiál obrobku a nástroje stýkají na vrcholcích nerovností. Tento druh opotřebení je významný zejména u nástrojových a rychlořezných ocelích. [27]

8.1.2. Difuzní opotřebení

K difuznímu opotřebení dochází po dosažení určité teploty při obrábění. U nástrojových a rychlořezných ocelí takové teploty nedosahujeme a k difuznímu opotřebení tudíž nedochází. Dochází k němu naopak při obrábění pomocí nástrojů ze slinutých karbidů, keramiky, polykrystalického diamantu, polykrystalického kubického nitridu boru (B_4C), atp. Podstata

tohoto opotřebení spočívá v přestupu hmoty z nástroje do obrobku pomocí difuze. V důsledku toho dochází ke změně chemického složení povrchových vrstev obrobku. [27]

8.1.3. Adhezní otěr

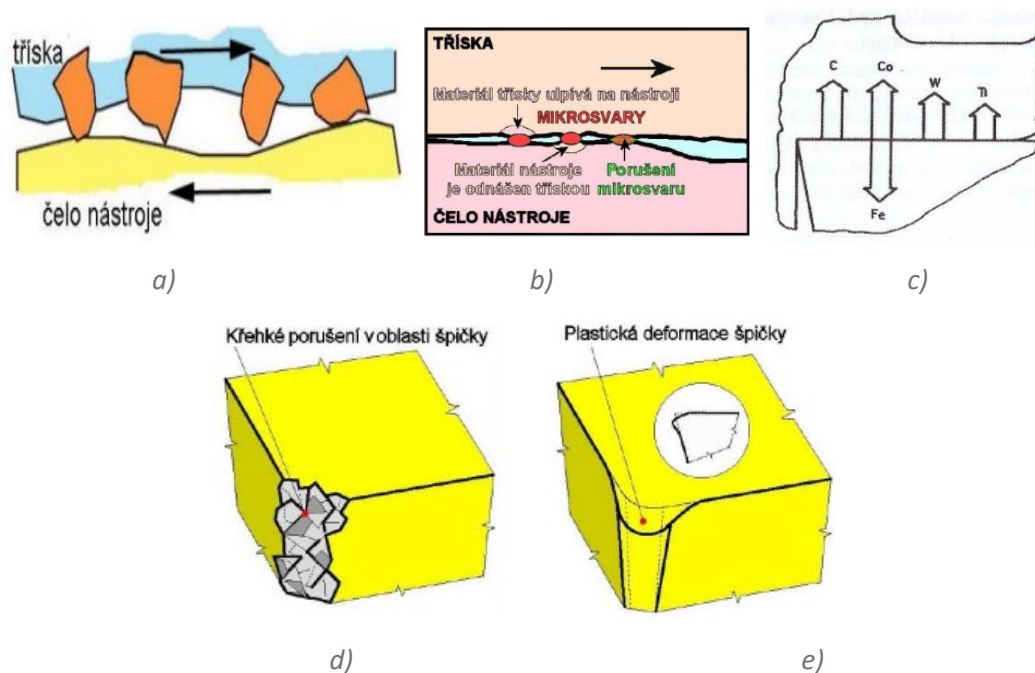
Při adhezním opotřebení dochází k vytrhávání částic nástroje, které jsou spojovány s obrobkem pomocí mikrospojů. Ty vznikají vzájemným působením tlaku a otěru na nerovnosti nástroje a obrobku, při kterém dochází k jejich částečnému natavování a jejich následnému svaření. Při dalším relativním pohybu nástroje, vzhledem k obrobku, dochází k utržení těchto spojů a s ním i části základního materiálu k jedné nebo druhé straně. [27]

8.1.4. Plastická deformace

Plastická deformace břitu se po dosažení určité (tzv. limitní) teploty vyskytuje u všech nástrojových materiálů. Jakmile je této teploty dosaženo, dochází k rychlému poklesu tvrdosti nástrojového materiálu v důsledku strukturních změn. Rychlost poklesu tvrdosti není u všech nástrojových materiálů stejná a odráží se v intenzitě plastické deformace břitu. Podstata plastické deformace je přesun tenké vrstvy materiálu nástroje z jeho povrchu v plastickém stavu. V důsledku toho je nástroj velice rychle opotřebováván. [27]

8.1.5. Křehký lom

Důsledkem příliš velkého silového působení na nástroj vzniká křehký lom, který spočívá buď ve vylomení větších částí břitu, vylamování menších (viditelných) částí, nebo vznikání povrchových trhlin, které však jsou většinou vidět až při broušení nástroje.



Obr. 28 – Znázornění opotřebení nástroje, a) abrazivní, b) adhezní, c) difuzní, d) křehký lom, e) plastická deformace [27]

8.2. Volba materiálu řezného nástroje

8.2.1. Rychlořezná ocel

Rychlořezná ocel je jeden z nejběžnějších materiálů pro výrobu nástrojů. Jedná se o nástrojové oceli obsahující velké množství legujících prvků, které zlepšují mechanické a řezné vlastnosti. Rychlořezné oceli se značí RO, nebo HSS (High Speed Steel).

Rychlořezné oceli musí mít vysokou odolnost vůči popouštění (hlavně při práci za vyšších teplotách), velkou tvrdost, pevnost a houževnatost. Dále je potřeba, aby tyto oceli měly dobrou kalitelnost a prokalitelnost. U většiny nástrojů je totiž vyžadována vysoká tvrdost při dobré houževnatosti jádra. [37]

Hlavní legující prvky rychlořezných ocelí:

- Wolfram – základní legujícím prvkem, který zvyšuje řezivost. Wolfram je částečně vázán na uhlík jako karbid wolframu, který je tvrdý a otěruvzdorný a z části rozpuštěn v matrici. Rychlořezné oceli mají obvykle obsah wolframu 5 až 20 %.
- Chrom – zlepšuje kalitelnost a prokalitelnost. Podobně jako wolfram je částečně rozpuštěn v matrici a částečně vázán na uhlík jako karbid. Obsah chromu v rychlořezných ocelích se pohybuje kolem 4 %.
- Vanad – převážně vázán jako karbid. Obsah vanadu se volí podle obsahu uhlíku. Čím více zvýšíme obsah vanadu, tím musíme zvýšit i obsah uhlíku, aby se vanad vázal jako karbid. Vanad zlepšuje odolnost proti opotřebení a popouštění.
- Molybden – slouží jako náhrada wolframu a tím se snižuje cena rychlořezných ocelí. Molybden má na vlastnosti rychlořezných ocelí podobný vliv jako wolfram, ale mají vyšší houževnatost, jsou náchylnější na oduhličení a přehřátí při kalení. Hodí se na nástroje pro přerušovaný řez.
- Kobalt – netvoří v rychlořezných ocelích karbidy a je rozpuštěn v základní matrici. Zvyšuje teplotu transformace a zvyšuje odolnost proti popouštění. [37]

Legujících prvků může být dále celá řada (např. Mn, Ti, Si, Ni, ...). Vhodnou kombinací jejich obsahu v rychlořezných ocelí dosáhneme vhodných vlastností pro konkrétní potřebu při obrábění.

Rychlořezné oceli získávají výsledné mechanické a technologické vlastnosti hlavně kalením a popouštěním. K následnému zlepšení obrobiteľnosti se dále žíhají naměkko. [37]

8.2.2. Slinuté karbidy (SK)

Slinuté karbidy jsou jedny z nejčastěji používaných nástrojových materiálů. SK jsou vyráběny práškovou metalurgií, kde se částice převážně karbidu wolframu (WC) a kovové pojivo s vysokým obsahem kobaltu spojuje za vysokých tlaků a teplot. Místo WC lze použít i karbidy titanu (TiC), tantalů (TaC) nebo niobu (NbC). Vyrábí se převážně jako břitové destičky různých tvarů. Tyto destičky mají nejrůznější geometrii vždy pro konkrétní použití. Nástroje z SK mají vysokou tvrdost, odolnost proti otěru a vysokou životnost. Vzhledem k vysoké tvrdosti jsou i značně křehké.

SK se základně dělí na povlakované a nepovlakované. Povlakované SK se používají častěji, neboť povlak zlepšuje řezné vlastnosti a prodlužuje životnost břitu.

Vzhledem k velkému množství různých použití SK byl vytvořen klasifikační systém ISO 513, který rozděluje SK dle použití. [22]

Tab. 5 – Rozdělení SK dle ISO 513 [38]

Id. číslo a barva	Obráběný materiál
P	Ocel: všechny druhy oceli a lité oceli, vyjma korozivzdorné oceli s austenitickou strukturou
M	Korozivzdorná ocel: korozivzdorná austenitická a austeniticko-feritická ocel a litá ocel
K	Litina: šedá litina, tvárná litina, temperovaná litina
N	Neželezné kovy: hliník a ostatní neželezné kovy, nekovové materiály
S	Superslitiny a titan: žáruvzdorné speciální slitiny na základě železa, niklu a kobaltu, titan a titanové slitiny
H	Tvrdé materiály: kalená ocel, kalené litinové materiály, tvrzená litina

Povlaky slynutých karbidů

Povlaky dodávají samotnému nástroji vhodné řezné vlastnosti pro konkrétní způsob aplikace. Povlaky společně s nástrojem pak tvoří nástrojovou třídu. Základní dva typy povlaků jsou tyto:

CVD povlaky

CVD (Chemical Vapour Deposition) povlak je nanášen chemickou depozicí z plynné fáze. Vzniká chemickými reakcemi při teplotách 700 až 1050 °C. Tyto povlaky se vyznačují skvělou otěruvzdorností a výbornou adhezí ke slinutým karbidům. CVD povlaky mají široké spektrum použití aplikacích, u kterých je zapotřebí odolnost proti otěru. S takovými aplikacemi se lze setkat při všeobecném soustružení a frézování tříd materiálu P, M, K.

Hlavní složky těchto povlaků jsou:

- MT-Ti(C,N) – Jeho tvrdost zajišťuje otěruvzdornost a menší opotřebení hřbetu nástroje.
- CVD- Al_2O_3 – Chemicky inertní s nízkou tepelnou vodivostí, což má za následek odolnost proti opotřebení ve tvaru žlábků. Dále funguje jako tepelná clona a zvyšuje odolnost proti plastické deformaci.
- CVD-TiN – Zlepšuje odolnost proti opotřebení. [27]

PVD povlaky

PVD (Physical Vapour Deposition) povlak je nanášen odpařením z pevné fáze. Tento proces probíhá za poměrně nízkých teplot (400 až 600 °C). Samotný proces se skládá z postupného odpaření kovu, který reaguje např. s dusíkem, přičemž na povrchu obráběcího nástroje vzniká tvrdý nitridový povlak. PVD povlaky díky své tvrdosti ještě zvyšují odolnost dané nástrojové třídy proti otěru. Jejich vnitřní tlaková pnutí také přinášejí zvýšení houževnatosti břitu a odolnosti proti tepelným hřebenovým trhlinám. PVD povlaky se používají u aplikací, kde je zapotřebí houževnatých, ale ostrých břitů. Tato aplikace jsou velmi rozšířené a zahrnují i všechny monolitní karbidové frézy a vrtáky. Dále jsou tyto povlaky často používány pro dokončovací operace. Hlavní složky PVD povlaků jsou:

- PVD-TiN – první povlak nanášený metodou PVD má univerzální vlastnosti a zlatou barvu
- PVD-Ti(C,N) – karbonitrid titanu je tvrdší než TiN a zlepšuje odolnost proti opotřebení na hřbetu
- PVD-(Ti,AlN) – titan aluminium nitrid je velice tvrdý a má vysokou odolnost proti oxidaci, což má za následek celkovou odolnost proti opotřebení
- PVD-oxidický – je využíván pro svou chemickou stabilitu a nízkou afinitu [27]

8.2.3. Polykrystalický kubický nitrid bóru (KNB)

Jedná se o materiál s mimořádně vysokou tvrdostí i za vysokých teplot (kolem 2000 °C) a lze jej proto použít při obrábění s velmi vysokými řeznými rychlostmi. Dále se vyznačuje velmi dobrou odolností vůči abrazivnímu opotřebení, skvělou chemickou stabilitou a velmi nízkou afinitou k ostatním prvkům. KNB se vyrábí slinováním částí kubického nitridu bóru s keramickým, popř. kovovým pojivem. Takto vytvořený materiál je vhodný především k obrábění ocelí s tvrdostí nad 45 HRC. Při obrábění ocelí s nižší tvrdostí dochází k rychlému opotřebení nástroje. [39]

8.2.4. Řezná keramika

Nástroje z řezné keramiky mají velkou otěruvzdornost a tvrdost. Dále je výhodou, že keramika chemicky nereaguje s materiálem obrobku. Je použitelná za vysokých teplot a tím i vysokých řezných rychlostí. Z toho důvodu jsou nejčastěji využívány na vysokorychlostní obrábění, ale je možné keramické nástroje použít i na oceli zakalené na vysokou tvrdost. Vzhledem k velké tvrdosti je řezná keramika náchylná na rázy, které mohou způsobit křehký lom nástroje.

Rozlišují se dva základní typy řezné keramiky. Jedná se o oxidickou keramiku na bázi Al_2O_3 a neoxidickou keramiku nitridovou na bázi Si_3N_4 . [39]

8.2.5. Polykrystalický diamant (PKD)

Polykrystalický diamant je kompozitní materiál. Skládá se z částic syntetického diamantu, které jsou slinovány dohromady pomocí kovového pojiva. Přírodní monokrystalický diamant je nejtvrděší známý materiál a syntetický polykrystalický diamant dosahuje téměř stejné tvrdosti. Díky tomu je PKD vysoce odolný proti abrazivnímu opotřebení, avšak nemá chemickou stabilitu a je velice afinný k železu, proto je náchylný k difuznímu opotřebení. Je tudíž pochopitelné, že se PKD používá na obrábění neželezných materiálů, jako třeba slitin hliníku a křemíku, polymerů, keramiky, kompozitních materiálů a podobně. Za určitých podmínek lze PKD použít také pro velmi jemné dokončovací operace (neboli superfinišování) při obrábění slitin niklu [39]

9. Mechanické vlastnosti povrchové vrstvy obrobku

Při obrábění dochází ke změnám vlastností povrchové vrstvy obráběné plochy. To se děje vlivem fyzikálních a někdy i chemických procesů, které způsobují změnu především mechanických vlastností, zpevnění povrchové vrstvy, výskytu zbytkových napětí, strukturních transformací atp. [27]

9.1. Změna pevnosti

Pevnost obrobené vrstvy se může měnit dle použitého technologie. Plastická deformace materiálu se v první řadě projeví deformačním zpevněním. Vnitřní vady v materiálu, které plastickou deformaci umožňují, se během deformace přesouvají a hromadí. Nahromaděné vady způsobují napjatost v krystalické mřížce, která se v makro pohledu projevuje zvýšením pevnosti a ztrátou plasticity.

Naproti tomu teplota v řezu indukovaná obráběním může tepelně ovlivnit obráběný materiál a způsobit změny vnitřní struktury. V případě kalených součástí s např. martenzitickou strukturou může teplota obrábění přesáhnout popouštěcí teplotu a způsobit snížení pevnosti a tím zhoršit požadované vlastnosti.

Změna deformačního chování souvisí právě se změnou pevnosti, pokud ve svrchní vrstvě dojde k náhlému a výraznému zpevnění proti materiálu jádra, může tato vrstva zcela ztratit schopnost plastické deformace. Problémem je vzájemná soudržnost, kdy může dojít k odloupení nebo vzniku trhlin v tvrdé části.

Dalším mechanismem zvyšování pevnosti, který je vázaný na materiál a jeho vnitřní strukturu, je indukovaná martenzitická přeměna plastickou deformací. Deformační energie, ať už vnesená pomocí tváření, obrábění nebo jiného procesu, způsobuje změnu tvaru matrice, který má v konečném důsledku vliv na zvýšení pevnosti. K těmto změnám může docházet za teplot nižších, než jsou běžné teploty fázových přeměn. [17]

Tento mechanismus patří mezi strukturní a fázové změny. Pro každý materiál je specifické jakými změnami prochází a za jakých podmínek.

Z tohoto pohledu představuje větší riziko broušení, teploty při broušení dosahují výrazně vyšších hodnot a mohou se dostat přes teploty fázových přeměn. Rychlost ohřevu bývá až 105 až 106 °C/s, ale působí pouze krátkodobě ve zlomcích vteřiny, vrstva zároveň relativně rychle chladne. Místa ohřevu jsou malá, a poměrně rychle se pohybují přes obráběný povrch. Teplotu lze snížit přívodem procesní kapaliny. Na strukturní změny jsou při broušení citlivé například zušlechtnuté oceli s metastabilní martenzitickou strukturou, například nástrojové a ložiskové oceli. Nesprávným broušením lze vyvolat dva základní typy podpovrchových struktur:

- a) Vysokopopuštěný martenzit
- b) Martenziticko-austenitická vrstva [17]

9.2. Zpevnění

Zpevnění povrchové vrstvy je především důsledkem toho, že oblast primárních plastických deformací často zasahuje pod úroveň budoucího povrchu.

Plastickou deformaci lze během obrábění rozdělit do tří oblastí a to oblast primární plastické deformace, oblast sekundární plastické deformace a rovinu stříhu, neboli oblast povrchové vrstvy obrobenej plochy. (viz obr. 29)

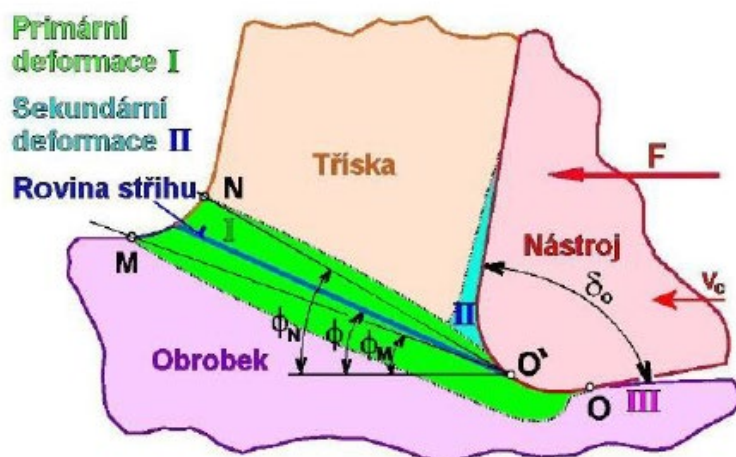
Hloubka zpevnění povrchové vrstvy závisí především na vlastnostech obráběného materiálu, tvaru nástroje a na deformačních podmínkách. Kovy, pro které jsou charakteristické dobré deformační schopnosti, jako jsou například slitiny hliníku a niklu, se zpevňují více než kovy, které jsou křehké. Hloubku a intenzitu zpevnění ovlivňují řezné podmínky a geometrické parametry obráběcího nástroje.

Důsledkem výše popsaného zpevnění povrchu obráběné součásti je především změna mechanických vlastností vrstvy, jako například pevnost, houževnatost apod. Hodnota zpevnění

se nejčastěji vyjadřuje mikrotvrdostí HV závislé na hloubce zpevnění, velikostí hloubky zpevněné vrstvy h_z a stupněm zpevnění K_z . Počítá se dle rovnice:

$$K_z = \frac{HV_z - HV_o}{HV_o} \cdot 100 [\%]$$

Kde HV_z je mikrotvrdost zpevněného materiálu a HV_o je mikrotvrdost nezpevněného (základního) materiálu.



Obr. 29 – Deformační oblasti při obrábění [40]

9.3. Mikrotvrdost

Mikrotvrdostí nazýváme tvrdost povrchu součásti, zjišťována pomocí velmi malých zatížení. Toto měření se využívá pro zjišťování tenkých vrstev, kde je potřeba eliminovat vliv základního materiálu. Pro zjišťování ovlivnění povrchové vrstvy obráběním je tato metoda velice vhodná. [41]

9.3.1. Měření mikrotvrdosti

Mikrotvrdost nelze měřit standartními tvrdoměry, neboť je zde požadována mnohonásobně větší přesnost zatěžující síly i měření výsledného vtisku. Nejpřesnější metoda měření mikrotvrdosti je zatěžování závažím, nebo přesně cejchovanou pružinkou. Výsledný vtisk se pak měří přesnou optikou. Indektory jsou pro mikrotvrdost vyráběné zcela výhradně z diamantu. Vzhledem k tomu jsou nejčastěji používaná metoda Vickersova, Knoopova nebo Bierkovičova. [27]

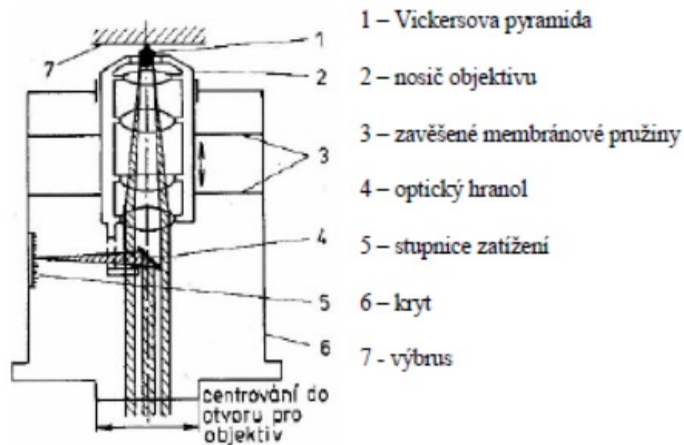
Jednou z nejpřesnějších konstrukcí je tzv. Hanemannův mikrotvrdoměr (obr. 30). Metoda spočívá v tom, že vnikací tělíčko (Vickersův jehlan) je usazeno přímo do speciálního objektivu, který se vloží do metalografického mikroskopu. Tento objektiv je zavěšen na pružných membránách, které umožní pohyb ve směru optické osy. Prohnutí membrán, které odpovídá zatížení se měří na stupnici uvnitř objektivu.

Po odlehčení se změří vytvořený otisk a výsledná mikrotvrdost se vypočítá ze vztahu:

$$HV = 0,1891 \cdot \frac{F}{u^2}$$

Kde F je zatěžující síla [N] a u je průměrná velikost úhlopříčky vtisku [mm].

Tato metoda je vhodná pro měření malých a tenkých součástí, křehké materiály, měření tvrdosti povlaků, měření povrchových vrstev po obrábění nebo chemicko-tepelném zpracování, apod. [42]



Obr. 30 – Schéma Hanemannova mikrotvrdoměru [42]

Zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse (HV)

Tato zkouška mikrotvrdosti je založena na klasické zkoušce makrotvrdosti dle Vickerse. Indentor se takřka shoduje, až na délku příčného ostří.

Síly jsou mnohem menší a to má za následek velmi drobné vtisky do materiálu. Vzhledem k velikosti je obtížnější vyhodnocování zkoušky. Povrchy součástí musí být velmi dobře opracovány. Indentor musí vždy směřovat kolmo na zkoušený povrch. Doba od začátku zatěžování až do maximální zátěžové síly musí ležet v intermalu 2 až 8 sec. Rychlost zatěžování pak nesmí překročit $0,2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Norma udává si minimální vzdálenost mezi vtisky a mezi vtiskem a okrajem. [43]

Označování mikrotvrdosti dle Vickerse vypadá takto:

$$X \text{ HV } F/t$$

Kde X je naměřená mikrotvrdost, HV je Vickersovo tvrdostní číslo, F je zátěžná síla [kp] a t je doba působení [s], která se neuvádí, pokud je v rozmezí 10 až 15 s. [27]

Zkouška mikrotvrdosti dle Knoop (HK)

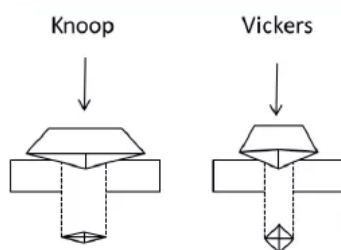
Princip zkoušky je velice podobný jako u Vickersovy zkoušky. Rozdíl je ve tvaru indentoru. U Knoopovy zkoušky se jedná rovněž o diamantový jehlan, jehož základnou však není čtverec, nýbrž velmi protáhlý kosočtverec. Vtisk má pak tvar kosočtverce s poměrem úhlopříček cca 1:7.

U tohoto vtisku se proměřuje pouze rozměr delší úhlopříčky. Výsledná tvrdost je pak dána vztahem:

$$HK = \frac{1,451 \cdot F}{L^2}$$

Kde F je zatěžující síla [N] a L je délka delší úhlopříčky [mm].

Stejně jako u zkoušky mikrotvrdosti podle Vickerse, musí být povrch zkoušeného materiálu připraven jako metalografický výbrus. Indentor musí směřovat kolmo ke zkoušenému povrchu a vzorek musí být na tvrdé podložce uložen tak, aby nedošlo k posunutí během zkoušení. Doba zatěžování od počátku do nominální hodnoty nesmí přesáhnout 10 s. Norma opět definuje minimální vzdálenost vpichů od sebe a také minimální vzdálenost vpichů od okraje vzorku. [27]



Obr. 31 – Rozdíl v indentorech a vtiskách u Knoopovy zkoušky (vlevo) a Vickersovy zkoušky (vpravo) [44]

9.4. Zbytková napětí

Jsou to taková napětí, která zůstávají v součásti i bez působení vnějších sil. Nejčastěji bývají vytvořena jako důsledek technologie výroby a vyskytují se v součástech jako nesoulad mezi různými částmi výrobku.

Hlavní faktor tvorby zbytkových napětí je nerovnoměrná plastická deformace, vysoké tlaky při obrábění a teplotní rozdíly v jednotlivých vrstvách materiálu. Tato napětí mají velmi negativní vliv na odolnost proti dynamickým zatížením, korozivzdornost, rozměrovou přesnost a jakost povrchové vrstvy.

Zbytková napětí může dělit dle směru působení na tahová a tlaková. Podle způsobu vzniku je můžeme dělit na vložena a vnitřní.

Tahová napětí snižuje mez únavy, neboť přispívají k šíření trhlin po povrchu součásti. Naopak tlaková napětí mez únavy zvyšuje díky tomu, že tyto trhliny zavírá. Druh i velikost napětí lze ovlivnit volbou rezných podmínek hlavně velikostí rezné rychlosti. [41]

Vnitřní zbytková napětí vznikají bez působení vnějších sil a jsou v rovnováze, zatímco vložena napětí jsou vyvolána působením vnějších sil na obráběnou součást.

9.4.1. Rozdělení zbytkových napětí

Dále můžeme napětí dělit z hlediska objemu, ve kterém dosahují rovnováhy na:

- Napětí I. druhu (makroskopická) – Napětí, která zasahují celou součást, nebo její podstatnou část. V případě narušení rovnováhy (odebráním povrchové vrstvy) se napětí projeví změnou makrogeometrie součásti.
- Napětí II. druhu (mikroskopická) – Napětí, která dosahují rovnováhy v několika krystalových zrn. Při porušení rovnováhy se nejčastěji nemění makrogeometrie součásti.)
- Napětí III. druhu (submikroskopická) – Napětí, která dosahují rovnováhy v objemu několika atomových vzdáleností. Porušením rovnováhy nevede nikdy ke změnám makrogeometrie součásti. [41]

9.4.2. Vznik zbytkových napětí

Příčin vzniku může být celá řada. Dělení těchto příčin může je a záleží na subjektivních kritériích autora daného dělení. Jedním příkladem dělení může být dle příčiny způsobení napětí.

Zbytkové napětí bylo způsobeno:

- Materiálem – vícefázové systémy, vměstky, mřížkové poruchy a vady.
- Pracovními podmínkami:
 - Mechanickými – důsledkem dřívějšího zatěžování (plastická deformace, únava)
 - Tepelnými – nehomogenní teplotní pole
 - Chemickými – elektrochemická koroze
- Procesy spojená s výrobou součásti
 - Odléváním
 - Tvářením
 - Obráběním
 - Svařováním
 - Povlakováním
 - Tepelným zpracováním [41]

9.4.3. Měření zbytkových napětí

V současné době existuje celá škála možností měření zbytkových napětí. O výběru vhodné metody rozhoduje především druh zkoumaného materiálu, geometrie součásti, poloha měření, požadovaná hloubka a dostupnost metody. Nejčastěji tyto měřící metody rozdělují podle dvou kritérií: [30]

Podle míry narušení celistvosti součásti

- **Nedestruktivní** – Nedochozí k narušení celistvosti součásti. Do této metody spadá většina fyzikálních metod
- **Semidestruktivní** – Malá míra narušení celistvosti, kde narušení nemá vliv na funkčnost součásti. Může být také prováděna na části, která byla pro tuto zkoušku přidána k součásti.
- **Destruktivní** – Při této metodě dochází ke zničení součásti. Tato metoda zahrnuje většinu mechanických zkoušek [30]

Podle principu měření

- **Mechanické**
- **Fyzikální**
- **Chemické** [30]

Rentgenová difrakce

- Elastické deformace uvnitř polykrystalického materiálu (změna rozteče mřížkových rovin)
- Jednoduché a snadno dostupné měření
- Difrakce rentgenových paprsků krystalovými rovinami [27]

Neutronová difrakce

- Využívá elastických deformací krystalové mřížky podobně jako princip rentgenové difrakce
- Velká hloubka měření materiálu
- Komplexní 3D mapy
- Vysoká cena [27]

Magnetické metody

- Feromagnetické vlastnosti materiálů jsou citlivé na stav vnitřní napjatosti z důvodu magnetostrikce a magnetického efektu
- Změna rozměrů tělesa v magnetickém poli
- Zachycení tzv. Barkhausenova šumu [27]

Ultrazukové metody

- Změny rychlosti ultrazukových vln vlivem velikostí a směrem napětí
- Změny rychlosti jsou malé – měří se spíše doba průchodu
- Prostorové rozlišení je špatné
- Možnost měřit většinu materiálů – vhodná pro rutinní inspekční měření [27]

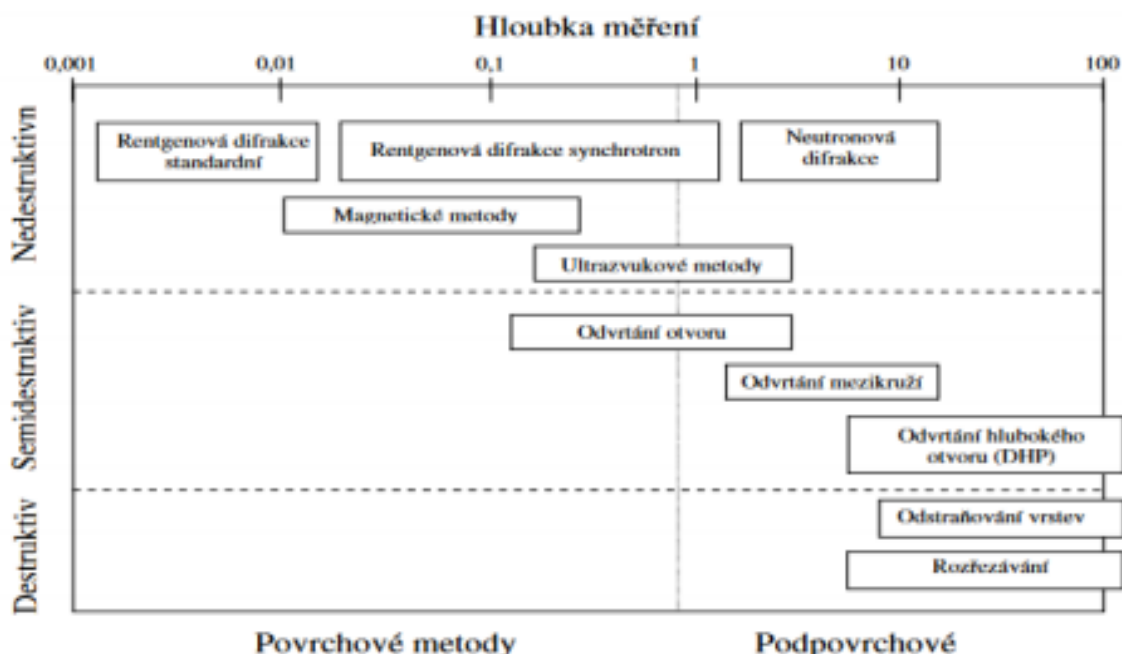
Metoda odvrtání otvoru

- Jedna z nejběžnějších technik
- Vyvrtání malého otvoru a následné měření relaxace
- Díra vyvrtána do součásti uprostřed tenzometrické růžice [27]

Metoda elektrolytického odleptání vrstev

Při měření se využívá odstraňování vrstev, na základě toho pak dojde k nerovnováze zbytkových napětí a následně snaze o docílení rovnováhy, což má za následek ohnutí vzorku. Metoda je celkem rychlá a jednoduchá. Velikost zakřivení závisí na velikosti a rozložení napětí v odstraněné vrstvě. Zakřivení vzorku lze následně měřit mnoha způsoby (od optických po elektrické). [27]

Na obr. 32 jsou názorně rozděleny jednotlivé metody zjišťování zbytkových napětí v součásti v závislosti na typu metody a dále je zde patrný i rozsah hloubky měření



Obr. 32 – metody pro zjišťování zbytkových napětí součásti [27]



10. Superslitina Inconel 713 LC

Slitina Inconel 713 LC je polykrystalická slitina niklu v litém stavu. Tato slitina vychází ze slitiny Inconel 713 C, avšak je modifikována. Teploty solidu i likvidu se posunuly o něco výš. Dále jsou pak změněny mechanické vlastnosti slitiny. Především se zvýšila plasticita, což bylo dosaženo snížením obsahem uhlíku. Hustota této slitiny je 7,95 g/cm³.

Tab. 6 – Chemické složení superslitiny Inconel 713 LC [45]

Prvek	Střední obsah prvků [hm. %]	Přípustné rozmezí obsahu prvků [hm. %]
C	0,05	0,03 - 0,07
Cr	12,00	11,00 - 13,00
Mo	4,50	3,80 - 5,20
Nb	2,00	1,50 - 2,50
Ta	2,00	1,50 - 2,50
Al	5,90	5,50 - 6,50
Ti	0,60	0,04 - 1,00
B	0,01	0,005 - 0,015
Zr	0,10	0,05 - 0,15
Si	co nejnižší	max. 0,50
Mn	co nejnižší	max. 0,25
Fe	co nejnižší	max. 0,50
Cu	co nejnižší	max. 0,50
S	co nejnižší	max. 0,015
Ni	základ	Základ

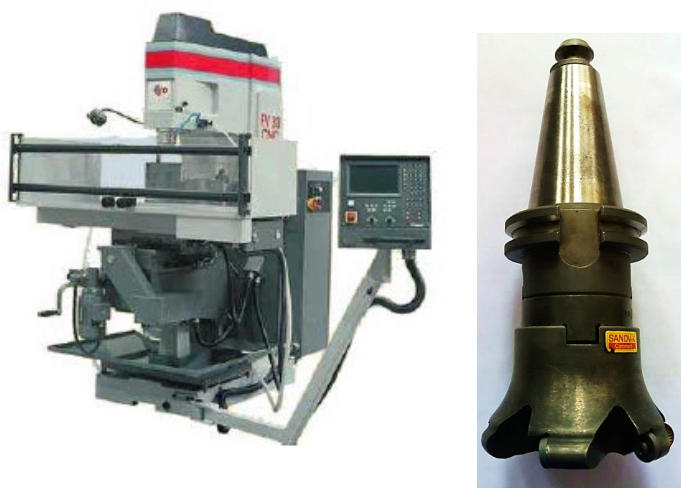
11. Experimentální část

Všechny experimenty byly prováděny v laboratořích Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie, Fakulty strojní, Českého vysokého učení technického v Praze (dále jen laboratoře).

11.1. Měření sil při čelním frézování

Při obrábění klade obráběný materiál určitý odpor, který je třeba překonat, a proto musí nástroj vytvořit dostatečné velkou sílu, aby byl odpor překonán. Řezná síla ovlivňuje veškeré dění v řezu. Z toho důvodu je velice potřebné sledovat závislost řezných sil na řezných podmínkách a geometrii nástroje. Sledování sil je vhodné hlavně proto, že poskytuje relativně přesné a okamžité výsledky.

Měření sil bylo prováděno v laboratořích na vertikální konzolové frézce FV 25 CNC A s řídicím systémem Heidenhain. Na stole frézky byl upnut tříosý stacionární piezoelektrický dynamometr 9265B od firmy Kistler. Na dynamometr byl upevněn obrobek ze slitiny Inconel 713 LC. Původní polotovar měl broušené stěny a měl rozměry 38x38x190 mm. Jako držák VBD byla použita fréza R 200 - 068Q27 - 12M od firmy Sandvik Coromant s účinným průměrem 63mm a s negativní geometrií čela -8° . Tento úhel je ve výsledku nutno odečíst od všech úhlů čela destiček, aby byl zjištěn výsledný úhel čela nástroje. Nástroji pak byly čtyři destičky s různými úhly čela a různými povlaky. Na držák byla umístěna vždy jen jedna kruhová destička o průměru 12 mm.



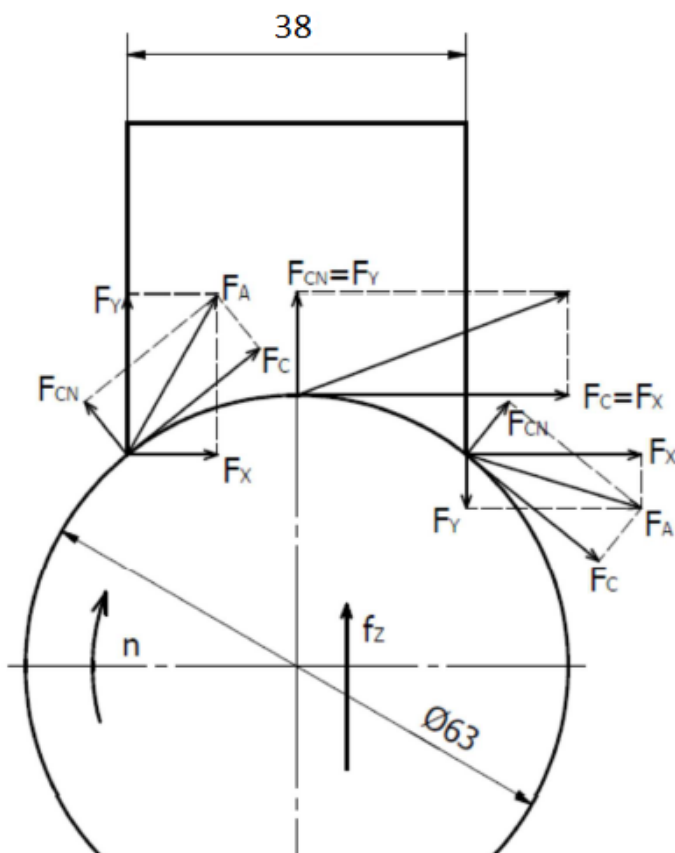
Obr. 33 – Použitý stroj a držák VBD



Obr. 34 – Polotovár obrobku

Byly zvoleny čtyři řezné rychlosti v_c (20, 35, 55 a 80 m/min) a pro každou z těchto rychlostí čtyři posuvy na zub f_z (0,05; 0,1; 0,15; 0,2 mm/z). Toto měření se provádělo pro každou destičku za konstantní hloubky řezu $a_p = 0,5$ mm. Celkem bylo tedy pro každou destičku provedeno měření pro 16 různých řezných podmínek.

Frézování bylo symetrické centrální. Jedná se o druh frézování, při kterém je osa nástroje totožná s osou symetrie obrobku. Vybraná metoda byla zvolena, neboť je jednoduchá na vyhodnocování sil. Rozklad sil při této metodě frézování je znázorněn na obr. 35. Lze zde vidět, že v polovině řezu je řezná síla F_c totožná se silou F_x a normálová F_{cn} je shodná s F_y .



Obr. 35 – Silový rozklad při symetrickém frézování



11.1.1. Postup měření

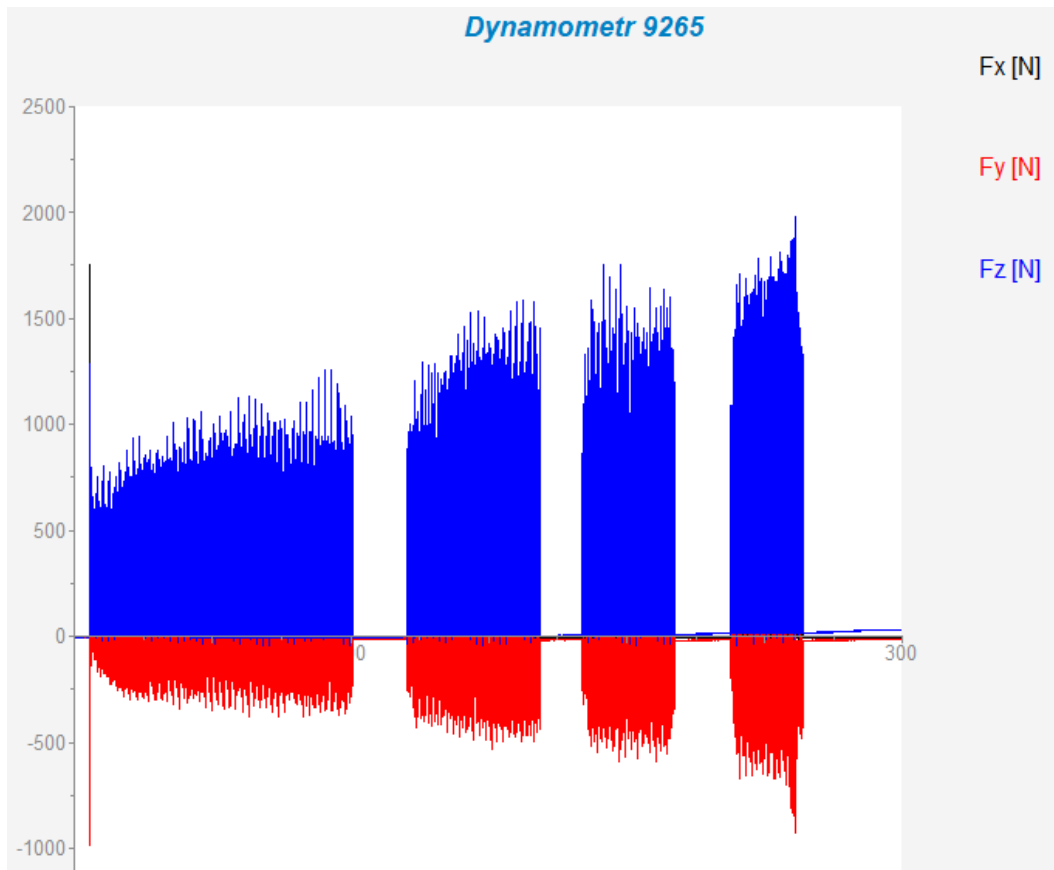
- 1) Upnout dynamometr pomocí šroubů ke stolu přes T-drážky
- 2) Uchytit polotovar pomocí upínek a pojistit proti posunutí především ve směru „x“
- 3) Zapnout kompresor a otevřít přívod vzduchu k frézce
- 4) Zapnout CNC frézku
- 5) Zapnout pohony stroje
- 6) Najet stroj do referenční polohy ve všech třech osách
- 7) Upnout držák a připevnit destičku na polohu, která ještě nebyla použita
- 8) Pomocí mikroposuvů (ovládacího kolečka) najít polohu polotovaru a zvolit vztažné body
- 9) Napsat NC program pro příslušné dráhy a řezné podmínky (nutné přepočítat řezné podmínky na minutový posuv a otáčky za minutu)
- 10) Připojit zesilovač k počítači do karty PCMCIA
- 11) Připojit kanály Ch1, Ch2, Ch3 a Ch4
- 12) Propojit zesilovač a počítač pomocí RS232
- 13) Připojit HW klíč do počítače od SW Dynoware
- 14) Zapojit dynamometr do zesilovače
- 15) Zapnout zesilovač, převodník a notebook
- 16) Na zesilovači nastavit BR na 1200
- 17) Na zesilovači nastavit IEEE – interface na „off“
- 18) Spustit program Dynoware
- 19) Načíst konfigurační soubor
- 20) Poslat načtené konfigurační parametry do zesilovače
- 21) Nastavit v Dynoware příslušné hodnoty měření (čas 300 s a frekvenci 1000 Hz)
- 22) Spustit měření
- 23) Zapnout NC program na stroji

11.1.2. Vyhodnocení měření

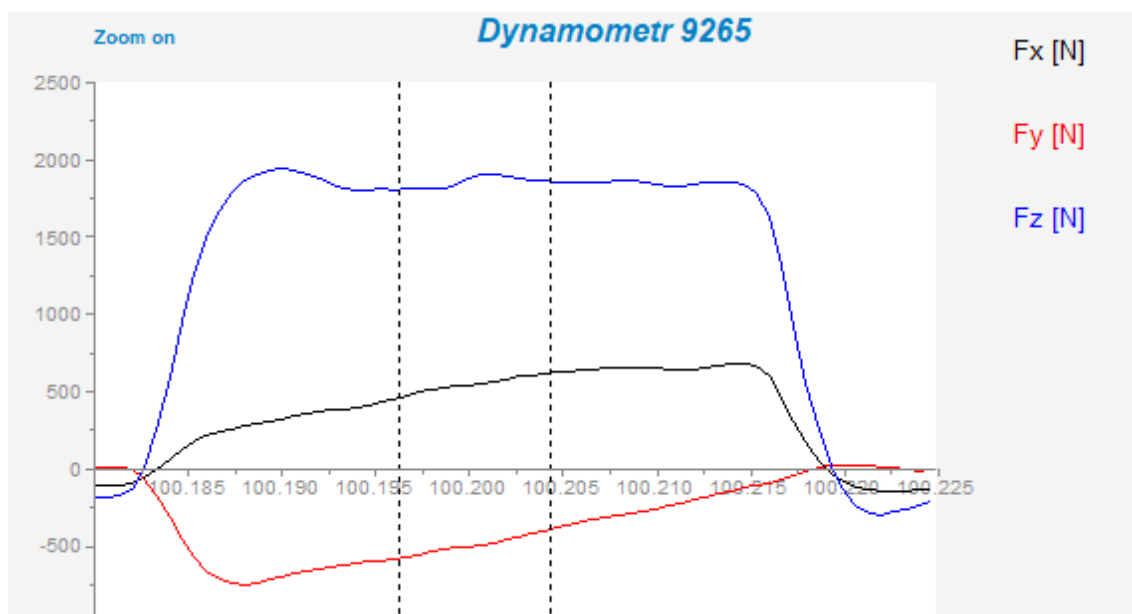
Záznamem z měření sil jsou grafické výstupy. Jedná se o závislosti jednotlivých složek sil na čase. Zobrazeny jsou jak jednotlivé složky v grafech, tak i všechny 3 složky v jednom grafu. Pro urychlení měření bude nejdůležitější právě tento „kombinovaný“ graf.

Pomocí programu Dynoware lze odečíst průměrnou hodnotu ze střední oblasti záběru. Toho je dosaženo tak, že po zvětšení jednotlivých záběrů se přes funkci „mean value“ označí střední hodnota záběru a program průměrnou hodnotu sám vypočítá. Názorný příklad vybírání střední hodnoty je znázorněn na obr. 37.

Střední oblast záběru byla zvolena ze stejného důvodu, z jakého se obrábí souměrně. Při výpočtu průměrné hodnoty ze střední oblasti je dosaženo bodu, kdy destička je právě v ose obrobku. V tomto bodě jsou jednotlivé síly totožné se složkami v pravoúhlém souřadném systému, a není zde tudíž potřeba přepočítávat síly přes goniometrické funkce (viz obr. 35).



Obr. 36 – Výsledný průběh měření sil z dynamometru



Obr. 37 – Příklad vybírání střední hodnoty z jednoho záběru destičky

Měření bylo provedeno pětkrát a následně byla, pomocí jednoduchého vzorce pro aritmetický průměr, vypočtena průměrná hodnota jednotlivých složek sil. Při měření je patrný mírný nárůst sil během měření. To je dáno s největší pravděpodobností, postupným opotřebením nástroje a tím pádem zhoršení jeho řezných podmínek.

Tab. 7 – Seznam použitých destiček a jejich specifikace

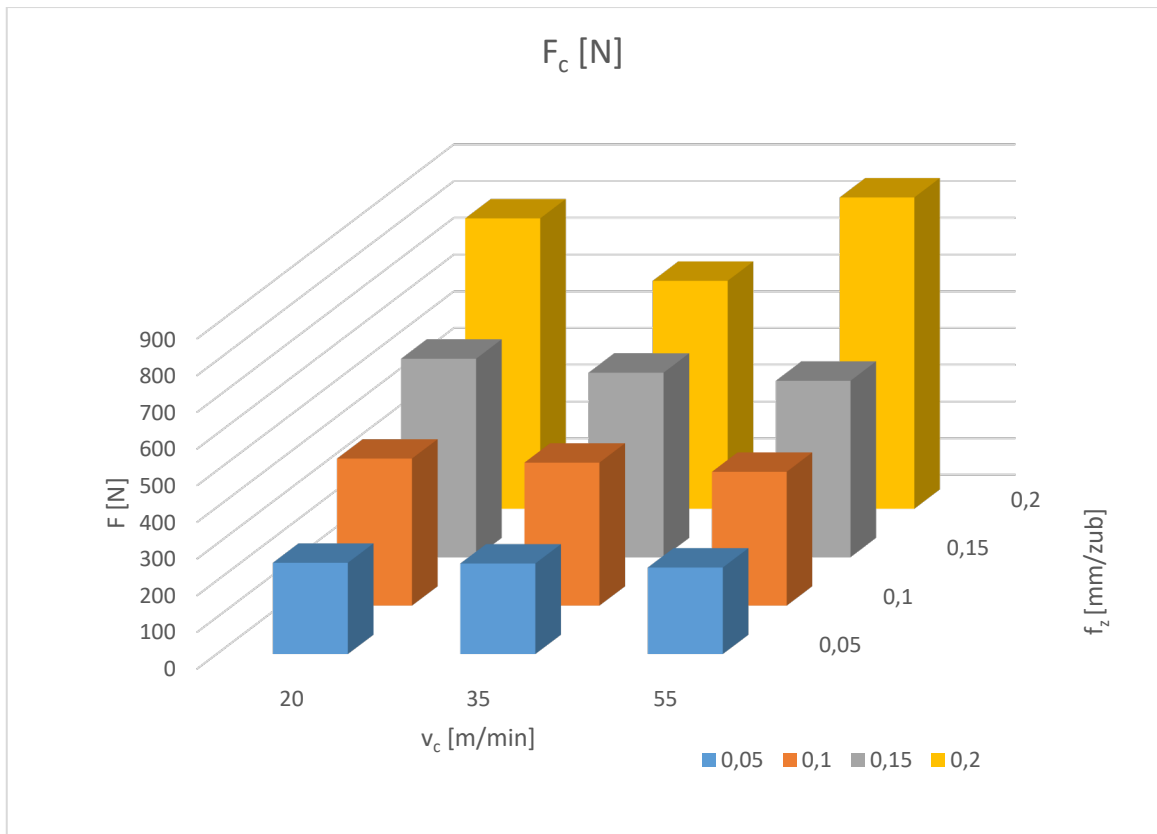
Použité destičky
ČVUT – $\gamma_o = -8^\circ$
CERATIZIT - RPHX 1204MOEN-M30, Utvařeč CTPM240 - $\gamma_o = 1^\circ$
CERATIZIT - RPHX 1204MOSN-M50, Utvařeč CTPM240 - $\gamma_o = 5,5^\circ$
CERATIZIT - RPHX 1204MOSN-F50, Utvařeč CTPM245 - $\gamma_o = 10^\circ$

11.1.3. Naměřené hodnoty sil

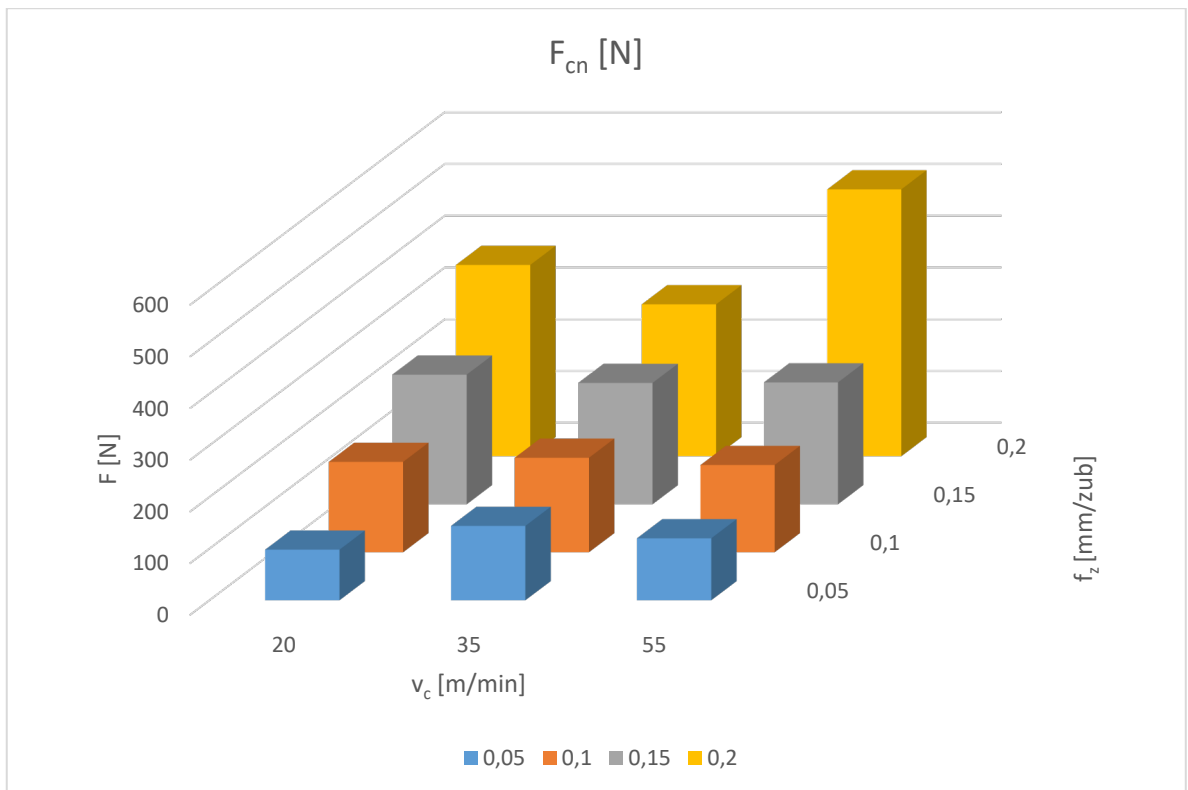
Vyhodnocení sil při frézování s úhlem $\lambda_o = -8^\circ$

Tab. 8 – Naměřené síly pro frézování s úhlem $\lambda_o = -8^\circ$

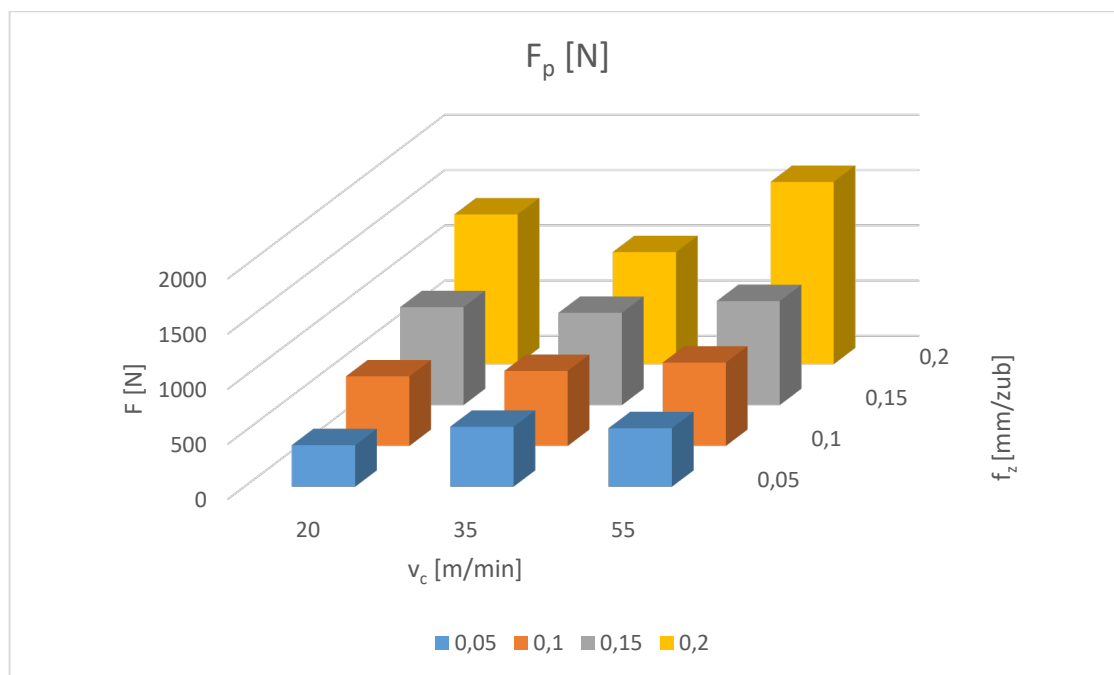
Destička ČVUT – $\gamma_o = -8^\circ$				
V_c [m/min]	Posuv f_z [mm/zub]	$F_z = F_c$ [N]	$F_y = F_{cn}$ [N]	$F_z = F_p$ [N]
20	0,05	249	98	377
	0,1	401	175	631
	0,15	541	251	888
	0,2	791	370	1357
35	0,05	247	144	544
	0,1	390	183	680
	0,15	503	235	837
	0,2	621	294	1016
55	0,05	236	120	531
	0,1	365	169	756
	0,15	481	236	943
	0,2	848	516	1652
80	0,05	Nebylo měřeno. Tato destička nezvládla takto vysoké rychlosti a při frézování praskla.		
	0,1			
	0,15			
	0,2			



Graf 1 – Závislost řezné síly na rychlosti a posuvu při obrábění s úhlem $\gamma_o = -8^\circ$



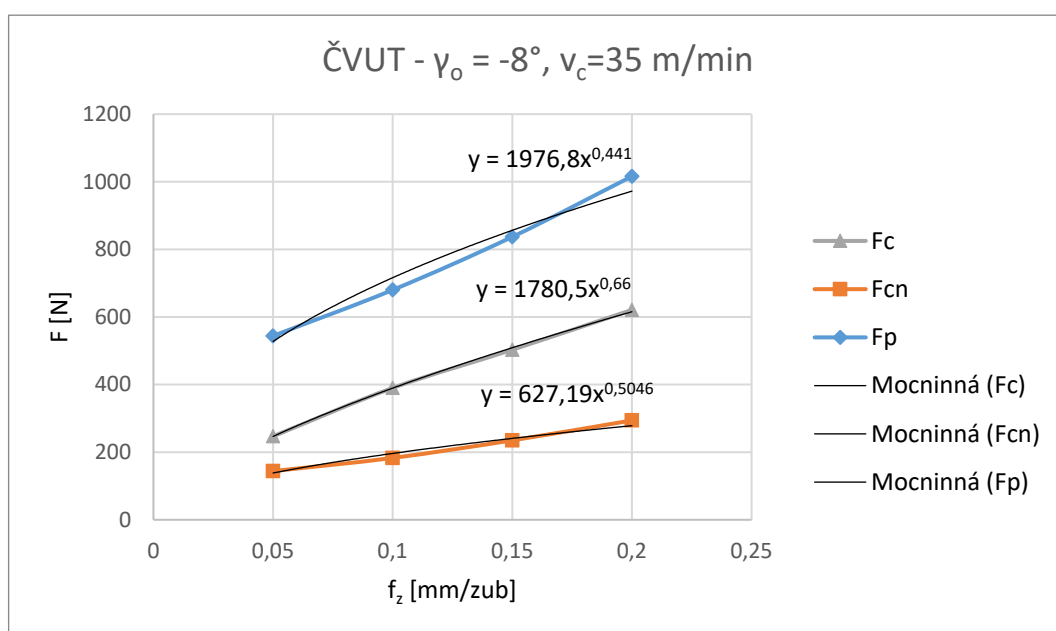
Graf 2 – Závislost normálové síly na rychlosti a posuvu při obrábění s úhlem $\gamma_o = -8^\circ$



Graf 3 – Závislost pasivní síly na rychlosti a posuvu při obrábění s úhlem $\gamma_o = -8^\circ$

U tohoto měření byla použita destička, které bylo ubroušeno čelo na ústavu obrábění FS ČVUT v Praze, a tak vznikla destička s úhlem čela 0° bez povlaku. Vzhledem k tomu, že držák destiček má úhel $\gamma_o' = -8^\circ$, výsledný úhel γ_o je tak -8° .

V tabulce 7 a v grafech 1, 2 a 3 jsou zobrazené naměřené hodnoty sil při frézování s úhlem čela $\gamma_o = -8^\circ$. Na výše zobrazených grafech je patrná změna jednotlivých složek sil v závislosti na řezné rychlosti a posuvu. Je patrné, že změna rychlosti nemá výrazný vliv síly. Oproti tomu změna posuvu velmi podstatně mění naměřené hodnoty sil přímou úměrou. Z grafů dále vyplývá, že nejnižší síly jsou při obrábění rychlosti okolo 35 m/min.

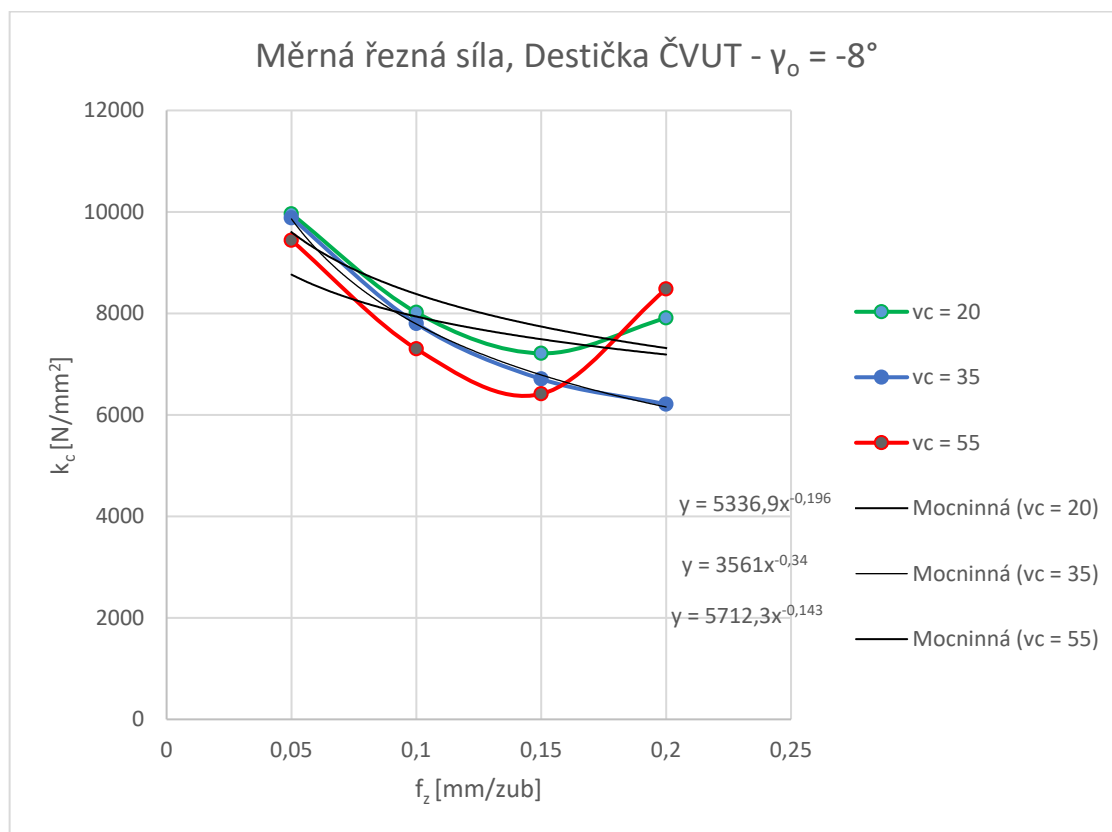


Graf 4 – Závislost jednotlivých silových složek na posuvu při řezné rychlosti 35 m/min

Z praxe je známo, že nejlepší řezná rychlost je pro Inconel právě kolem 35 m/min, čemuž zde odpovídají i naměřené hodnoty. Tuto hodnotu uvádí mimo jiné i odborníci na obrábění ve výrobní společnosti, která se specializuje na výrobu rotačních komponentů leteckých motorů z těžko obrobitelných materiálů, zejména Inconelů. Výše na grafu 4 můžeme vidět růst jednotlivých složek sil v závislosti na posuvu při řezné rychlosti 35 m/min. Je zde patrné, že síly rostou téměř lineárně.

Tab. 9 – Hodnoty měrné řezné síly pro jednotlivé posuvy

Destička ČVUT – $\gamma_o = -8^\circ$	k_c [N/mm ²]	f_z [mm/zub]
$v_c = 20$	9960	0,05
	8020	0,1
	7213	0,15
	7910	0,2
$v_c = 35$	9880	0,05
	7800	0,1
	6707	0,15
	6210	0,2
$v_c = 55$	9440	0,05
	7300	0,1
	6413	0,15
	8480	0,2



Graf 5 – Závislost měrné řezné síly na posuvu při obrábění s úhlem $\gamma_o = -8^\circ$

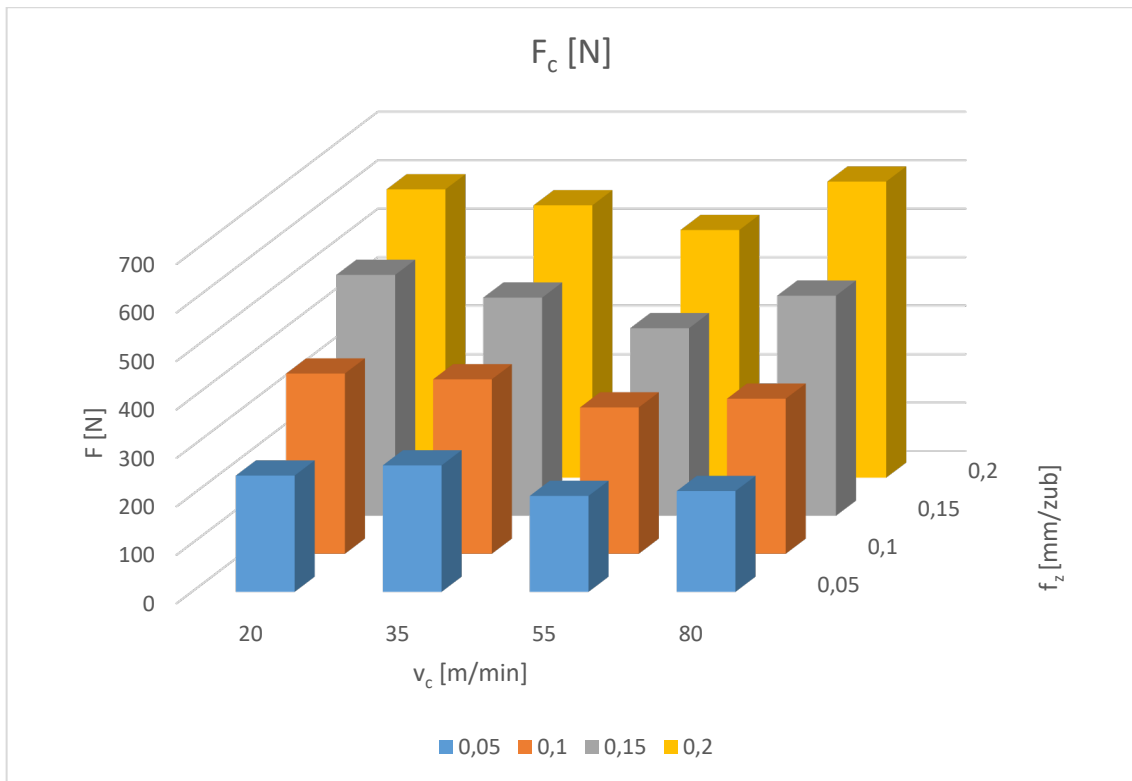
Na výše uvedeném grafu 5 jsou znázorněny hodnoty měrné řezné síly k_c v závislosti na posuvu na zub pro jednotlivé řezné rychlosti. Měrná řezná síla byla vypočítána pro tento i následující případy pomocí jednoduchého výpočtu $k_c = \frac{F_c}{S_t}$, kde F_c je řezná síla a S_t je průřez třísky, který je roven násobku posuvu na zub f_z a hloubky řezu a_c . Hodnoty příslušných měrných řezných odporů jsou pak v tabulce 8, která je uvedena nad grafem.

Z grafu je patrné, že u menších posuvů nedochází ke zpevnování materiálu při všech rychlostech, ale při větších posuvech již ke zpevnění dochází kromě rychlosti 35 m/min. Při této rychlosti klesá měrná řezná síla i při větších posuvech. Trend měrné řezné síly je klesající a po proložení křivek mocninnou funkcí je zřejmé, že exponenty jsou záporné. U posuvu 0,2 mm/zub vychází hodnoty, které se neztotožňují s předpokládaným trendem. Tento fakt byl ověřen a bylo by potřeba dalšího zkoumání důvodů tohoto jevu, který není shodný s teoretickými předpoklady.

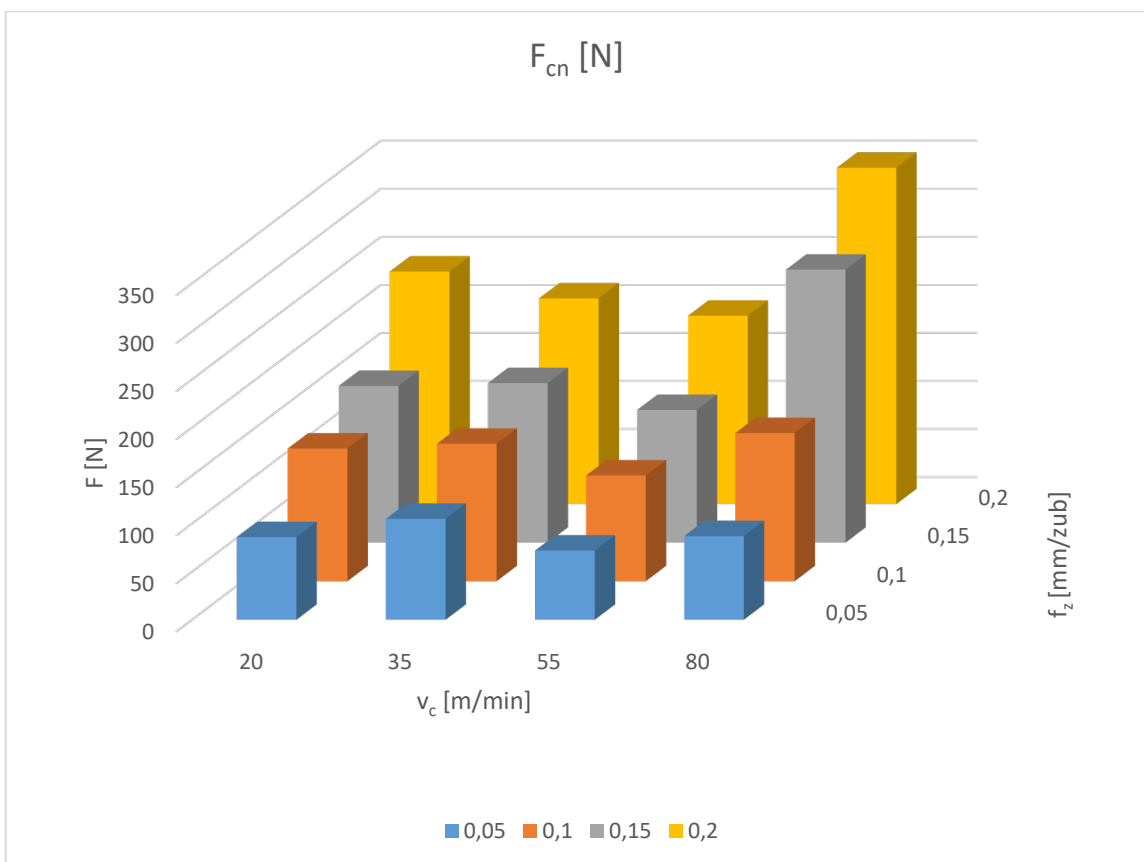
Vyhodnocení sil při frézování s úhlem $\gamma_o = 1^\circ$

Tab. 10 – Naměřené síly při frézování s úhlem $\gamma_o = 1^\circ$

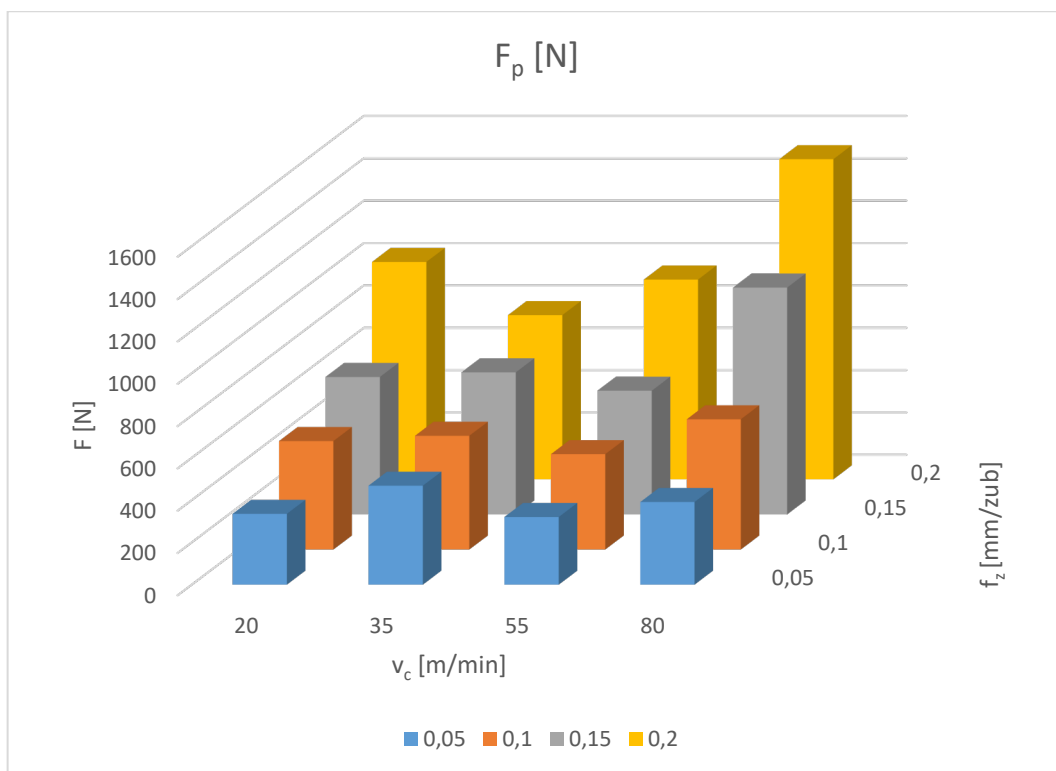
Destička RPHX 1204MOEN-M30 – $\gamma_o = 1^\circ$				
V_c [m/min]	Posuv f_z [mm/zub]	$F_z = F_c$ [N]	$F_y = F_{cn}$ [N]	$F_z = F_p$ [N]
20	0,05	240	86	335
	0,1	372	138	513
	0,15	497	163	650
	0,2	595	242	1027
35	0,05	261	105	468
	0,1	360	143	538
	0,15	450	166	672
	0,2	562	214	776
55	0,05	198	72	320
	0,1	302	110	451
	0,15	387	138	585
	0,2	511	196	944
80	0,05	208	87	391
	0,1	320	154	616
	0,15	454	284	1072
	0,2	611	350	1512



Graf 6 – Závislost řezné síly na rychlosti a posuvu při obrábění s úhlem $\gamma_o = 1^\circ$



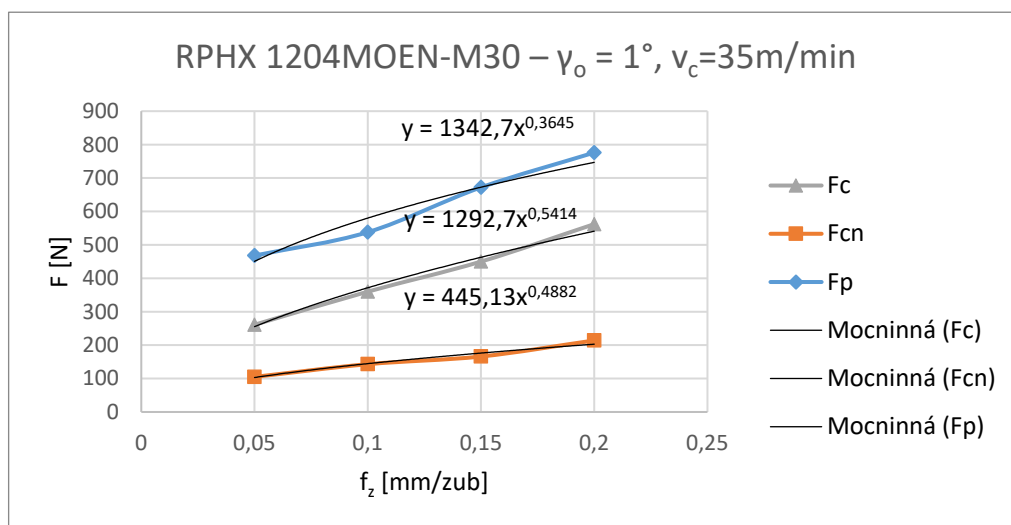
Graf 7 – Závislost normálové síly na rychlosti a posuvu při obrábění s úhlem $\gamma_o = 1^\circ$



Graf 8 – Závislost pasivní síly na rychlosti a posuvu při obrábění s úhlem $\gamma_o = 1^\circ$

U tohoto měření byla použita destička s úhlem čela 9° s povlakem PVD. Vlivem držáku destiček, který má úhel $\gamma_o' = -8^\circ$ je výsledný úhel $\gamma_o = 1^\circ$.

V tabulce 9 a v grafech 6, 7 a 8 jsou zobrazené naměřené hodnoty sil při frézování s úhlem čela $\gamma_o = 1^\circ$. Na zobrazených grafech je patrná změna jednotlivých složek sil v závislosti na řezné rychlosti a posuvu. Je patrné, že změna rychlosti nemá výrazný vliv na síly. Oproti tomu změna posuvu velmi podstatně mění naměřené hodnoty sil přímo úměrou. Z grafů dále vyplývá, že nejnižší řezné a normálové složky sil jsou při obrábění rychlosti okolo 55 m/min. Pasivní složka je pak nejmenší při rychlostech okolo 35 m/min.

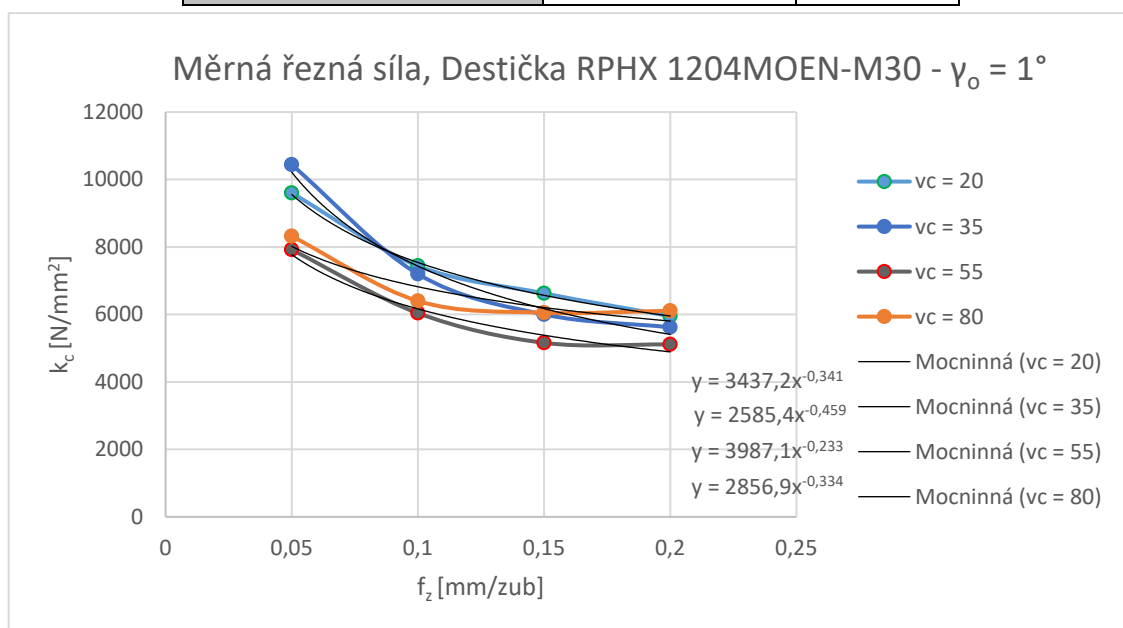


Graf 9 – Závislost jednotlivých silových složek na posuvu při řezné rychlosti 35 m/min

Podobně jako u předchozího případu měření je z praxe známo, že nejvhodnější řezná rychlost je pro Inconel právě kolem 35 m/min. Výsledky měření však ukazují, že nejmenší řezné síly jsou spíše kolem 55 m/min. Hodnotu 35 m/min jako nejlepší řezné rychlosti pro obrábění Inconelu uvádí i odborníci na obrábění z GE Aviation Czech, kteří se specializují na výrobu rotačních komponentů leteckých motorů z těžko obrobitelných materiálů, zejména Inconelů. Výše na grafu 9 můžeme vidět růst jednotlivých složek sil v závislosti na posuvu při řezné rychlosti 35 m/min. Je zde patrné, že síly rostou téměř lineárně.

Tab. 11 – Hodnoty měrné řezné síly pro jednotlivé posuvy

Destička RPHX 1204MOEN-M30 – $\gamma_o = 1^\circ$	k_c [N/mm ²]	f_z [mm/zub]
$v_c = 20$	9600	0,05
	7440	0,1
	6627	0,15
	5950	0,2
$v_c = 35$	10440	0,05
	7200	0,1
	6000	0,15
	5620	0,2
$v_c = 55$	7920	0,05
	6040	0,1
	5160	0,15
	5110	0,2
$v_c = 80$	8320	0,05
	6400	0,1
	6053	0,15
	6110	0,2



Graf 10 – Závislost měrné řezné síly na posuvu při obrábění s úhlem $\gamma_o = 1^\circ$

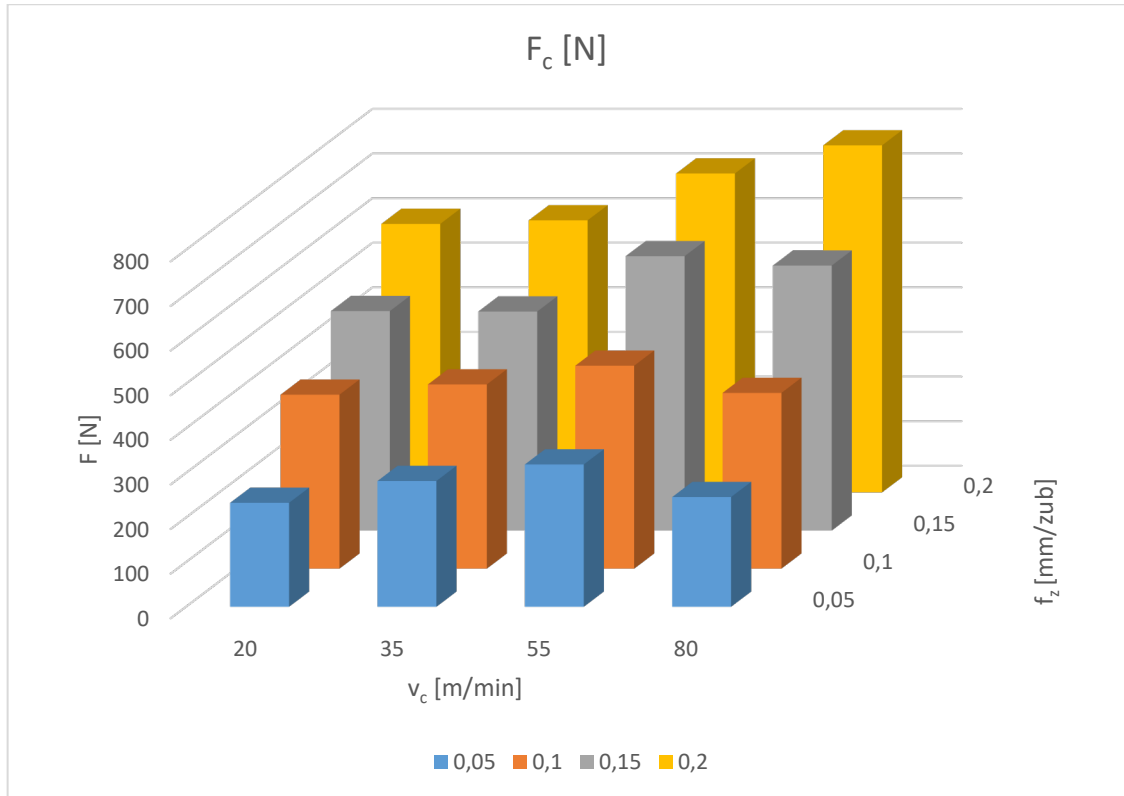
Na grafu 10 jsou znázorněny hodnoty měrné řezné síly k_c v závislosti na posuvu na zub pro jednotlivé řezné rychlosti při frézování s úhlem $\gamma_o = 1^\circ$. Přesné hodnoty příslušných měrných řezných odporů jsou pak v tabulce 10, která je uvedena nad grafem.

Z grafu je patrné, že při použití této geometrie nástroje nedochází ke zpevňování materiálu. Při větších posuvech tedy klesá měrná řezná síla. Trend měrné řezné síly je klesající a po proložení křivek mocninnou funkcí je zřejmé, že exponenty jsou záporné díky tomu, že funkce jsou klesající. Při větších posuvech již snižování měrné řezné síly není tak intenzivní.

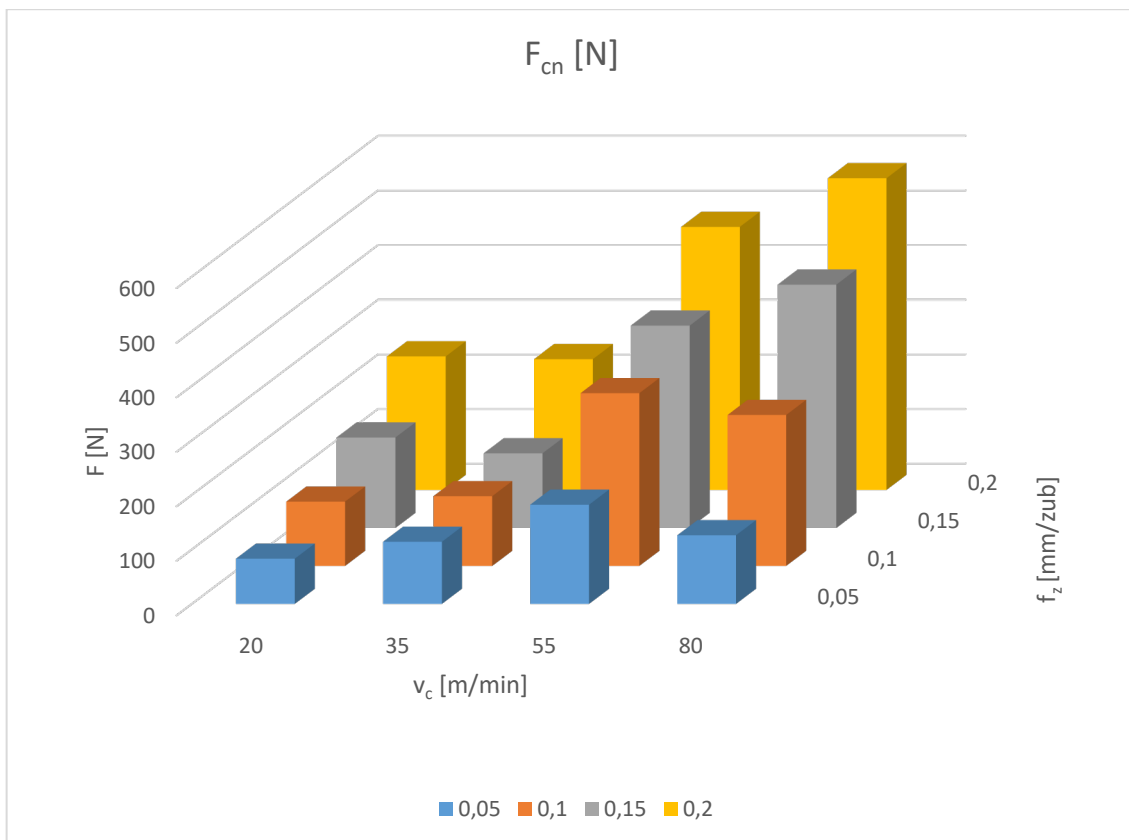
Vyhodnocení sil při frézování s úhlem $\gamma_o = 5,5^\circ$

Tab. 12 – Naměřené síly při frézování s úhlem $\gamma_o = 5,5^\circ$

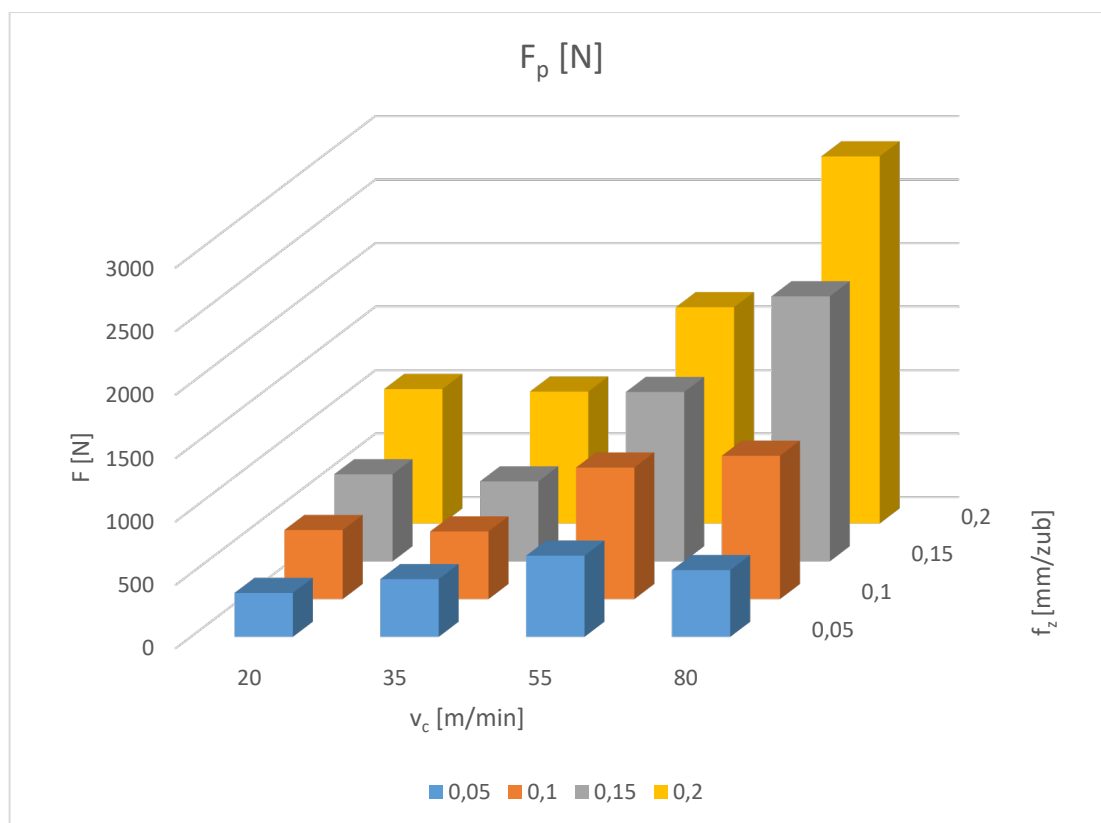
Destička RPHX 1204MOSN-M50 – $\gamma_o = 5,5^\circ$				
Vc [m/min]	Posuv Fz [mm/zub]	Fx = Fc [N]	Fy = Fcn [N]	Fz = Fp [N]
20	0,05	233	83	346
	0,1	390	118	544
	0,15	492	166	686
	0,2	602	245	1060
35	0,05	282	114	455
	0,1	413	128	533
	0,15	491	137	630
	0,2	610	240	1040
55	0,05	319	182	640
	0,1	455	317	1037
	0,15	615	371	1335
	0,2	715	482	1704
80	0,05	246	126	526
	0,1	394	277	1130
	0,15	594	446	2088
	0,2	778	571	2891



Graf 11 – Závislost řezné síly na rychlosti a posuvu při obrábění s úhlem $\gamma_o = 5,5^\circ$



Graf 12 – Závislost normálové síly na rychlosti a posuvu při obrábění s úhlem $\gamma_o = 5,5^\circ$

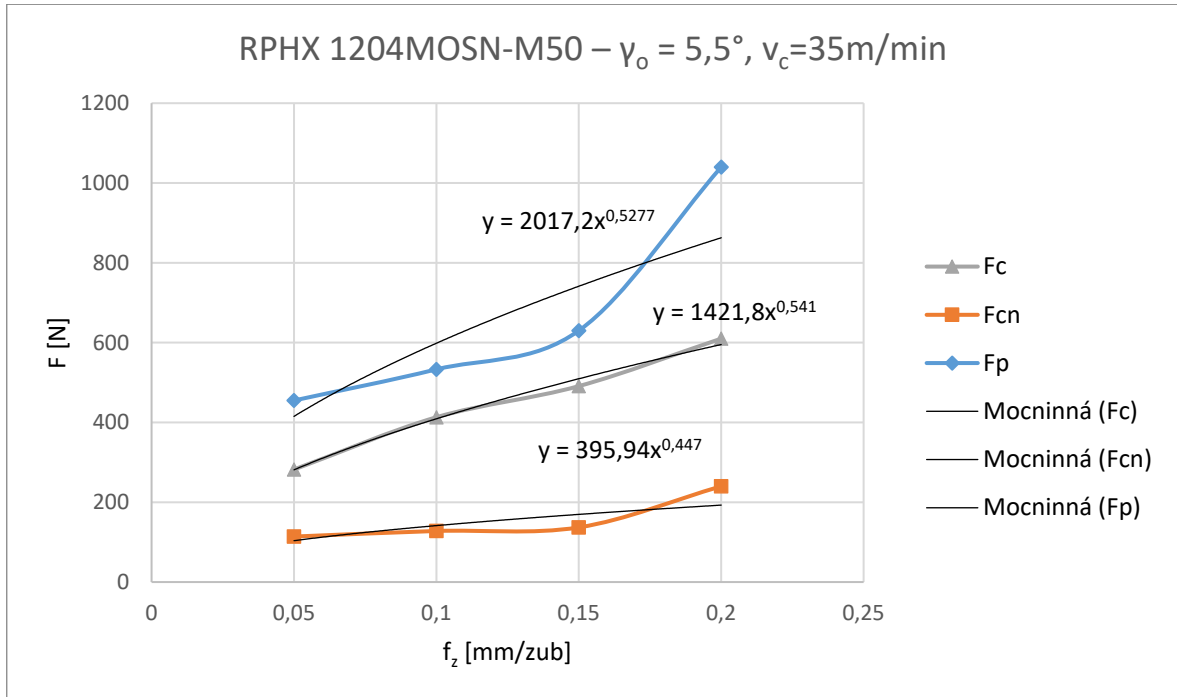


Graf 13 – Závislost pasivní síly na rychlosti a posuvu při obrábění s úhlem $\gamma_o = 5,5^\circ$

U tohoto měření byla použita destička s úhlem čela $13,5^\circ$ s povlakem PVD. Vlivem držáku destiček, který má úhel $\gamma_o' = -8^\circ$, je výsledný úhel $\gamma_o = 5,5^\circ$.

V tabulce 11 a v grafech 11, 12 a 13 jsou zobrazené naměřené hodnoty sil při frézování s úhlem čela $\gamma_o = 5,5^\circ$. Na výše zobrazených grafech je patrná změna jednotlivých složek sil v závislosti na řezné rychlosti a posuvu. Dále je patrné, že změna rychlosti nemá výrazný vliv síly. Oproti tomu změna posuvu velmi podstatně mění naměřené hodnoty sil přímo úměrou. Z grafů také vyplývá, že nejnižší síly jsou při obrábění rychlosti okolo 35 m/min. Při této rychlosti jsou nejnižší všechny složky sil. Tento jev je patrnější při větších posuvech.

Vysoké hodnoty u velkých posuvů při vysokých rychlostech je patrně dáno značným opotřebením nástroje. Vzhledem k metodice experimentu, kdy při jedné řezné rychlosti byly postupně měřeny síly při posuvech od nejmenšího k největšímu je jasné, že opotřebením i větších posuvů bylo již značné a tento fakt mohl do značné míry ovlivnit velikosti sil. Opotřebením je popsáno v kapitole 11.3.

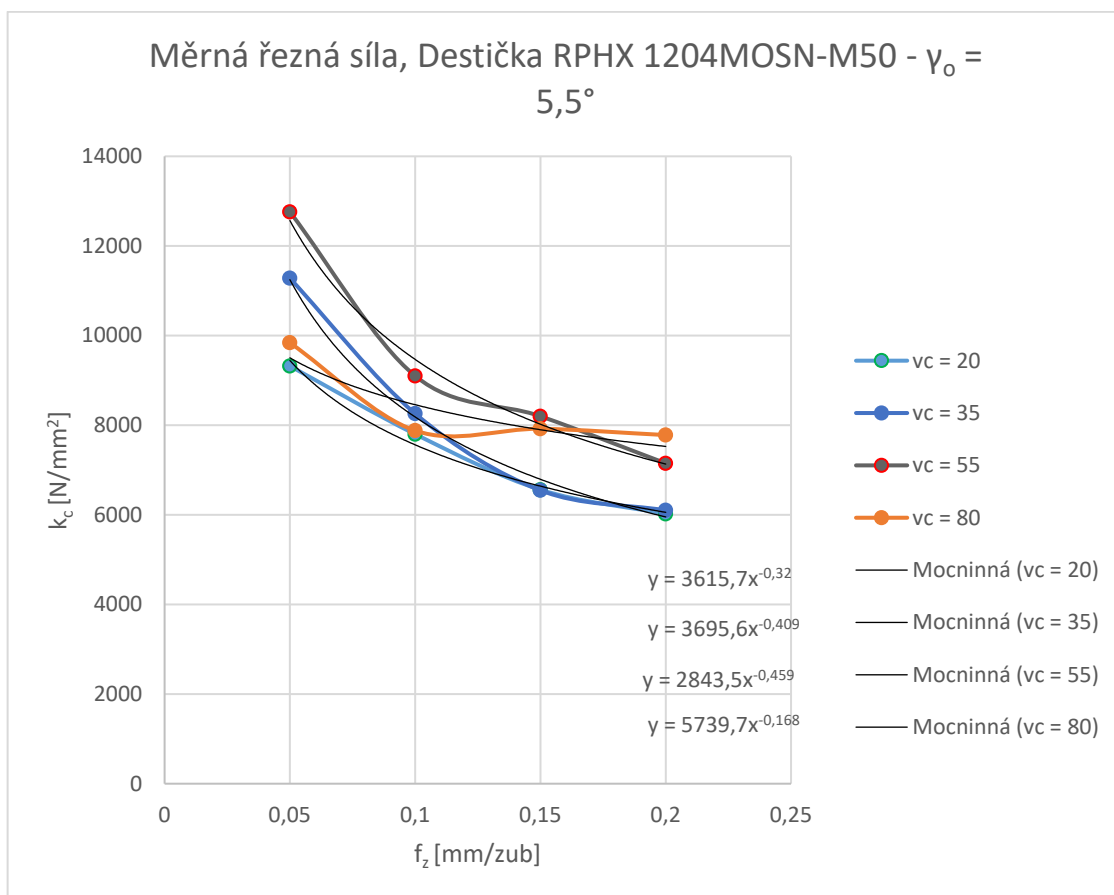


Graf 14 – Závislost jednotlivých silových složek na posuvu při řezné rychlosti 35 m/min

Stejně jako u předchozích dvou případů zkoumání víme, že vhodná řezná rychlost je pro Inconel právě kolem 35 m/min. Výsledky měření ukazují, že nejmenší řezné síly jsou právě kolem 35 m/min, což odpovídá teoretickým předpokladům. Hodnotu 35 m/min jako nejvhodnější řezné rychlosti pro obrábění Inconelu uvádí také odborníci na obrábění z GE Aviation Czech, kteří se specializují na výrobu komponentů leteckých motorů z těžko obrobitelných materiálů, zejména Inconelů. Výše na grafu 14 můžeme vidět růst jednotlivých složek sil v závislosti na posuvu při řezné rychlosti 35 m/min. Je zde patrné, že síly rostou téměř lineárně, vyjma hodnot při posuvu 0,2 mm/zub, což mohlo být způsobeno opotřebením břitu destičky.

Tab. 13 – Hodnoty měrného řezného odporu pro jednotlivé posuvy

Destička RPHX 1204MOSN-M50 – $\gamma_o = 5,5^\circ$	k_c [N/mm ²]	f_z [mm/zub]
$v_c = 20$	9320	0,05
	7800	0,1
	6560	0,15
	6020	0,2
$v_c = 35$	11280	0,05
	8260	0,1
	6547	0,15
	6100	0,2
$v_c = 55$	12760	0,05
	9100	0,1
	8200	0,15
	7150	0,2
$v_c = 80$	9840	0,05
	7880	0,1
	7920	0,15
	7780	0,2



Graf 15 – Závislost měrného řezného odporu na posuvu při obrábění s úhlem $\gamma_o = 5,5^\circ$

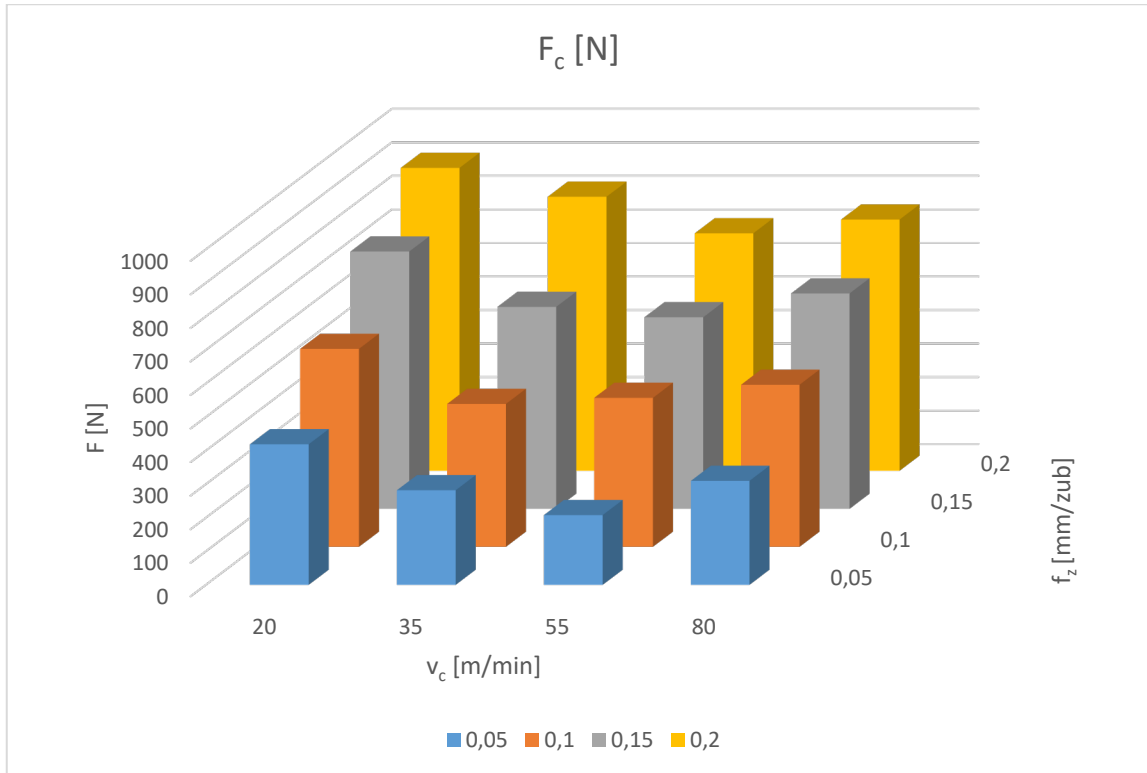
Na grafu 15 jsou znázorněny hodnoty měrného řezného odporu k_c v závislosti na posuvu na zub pro jednotlivé řezné rychlosti při frézování s úhlem $\gamma_o = 5,5^\circ$. Přesné hodnoty příslušných měrných řezných odporů jsou pak v tabulce 13, která je uvedena nad grafem.

Z grafu je patrné, že při použití této geometrie nástroje nedochází ke zpevňování materiálu. Trend měrné řezné síly je klesající a po proložení křivek mocninnou funkcí je zřejmé, že exponenty jsou záporné díky tomu, že funkce jsou klesající. Při větších posuvech již snižování měrné řezné síly není tak intenzivní.

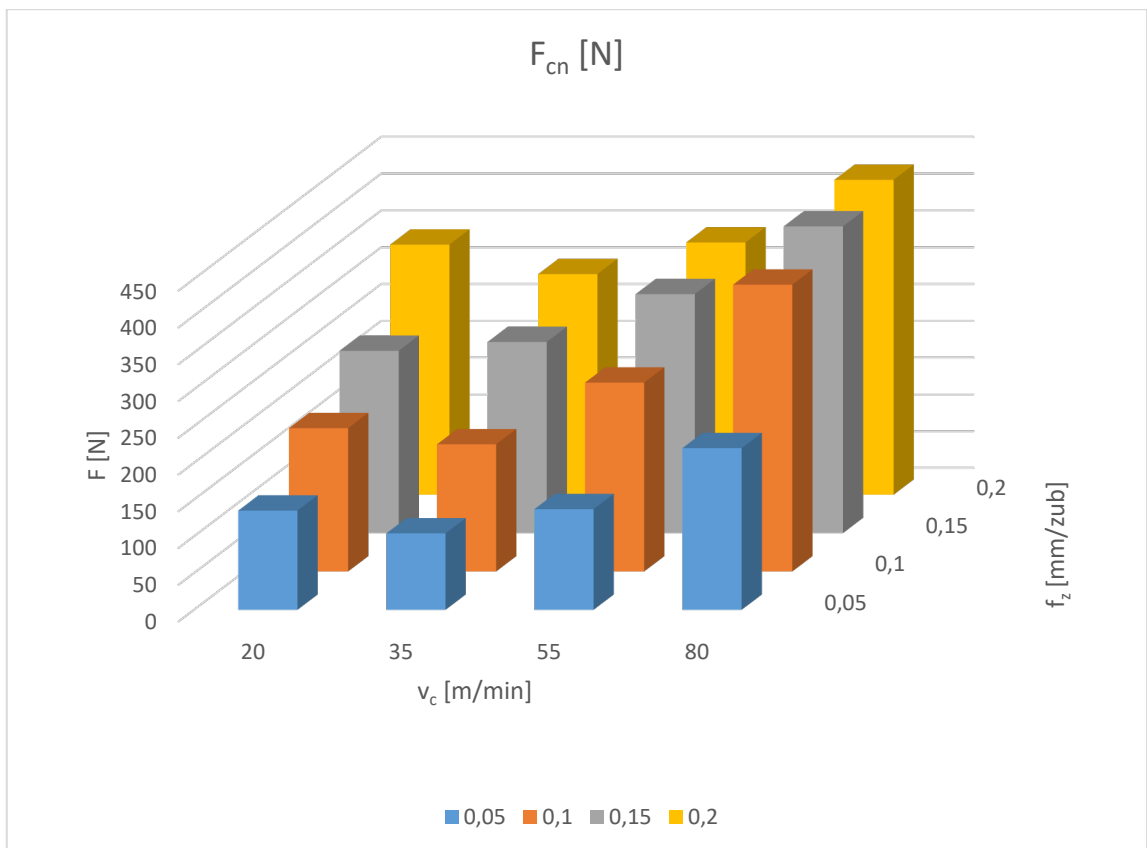
Vyhodnocení sil při frézování s úhlem $\gamma_o = 10^\circ$

Tab. 14 – Naměřené síly při frézování s úhlem $\gamma_o = 10^\circ$

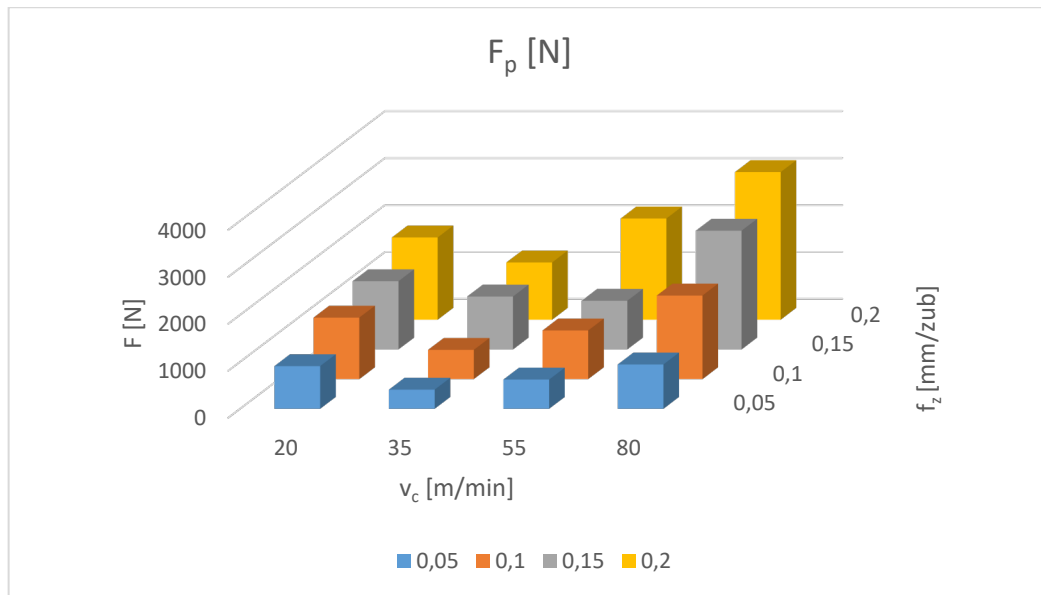
Destička RPHX 1204MOSN-F50 – $\gamma_o = 10^\circ$				
Vc[m/min]	Posuv Fz [mm/zub]	Fx = Fc [N]	Fy = Fcn [N]	Fz = Fp [N]
20	0,05	419	135	909
	0,1	590	195	1310
	0,15	767	248	1453
	0,2	903	340	1752
35	0,05	282	104	408
	0,1	426	173	623
	0,15	602	260	1127
	0,2	765	300	1220
55	0,05	208	137	623
	0,1	444	257	1036
	0,15	571	325	1869
	0,2	708	343	2156
80	0,05	310	220	944
	0,1	483	390	1780
	0,15	642	417	2528
	0,2	749	428	3144



Graf 16 – Závislost řezné síly na rychlosti a posuvu při obrábění s úhlem $\gamma_o = 10^\circ$



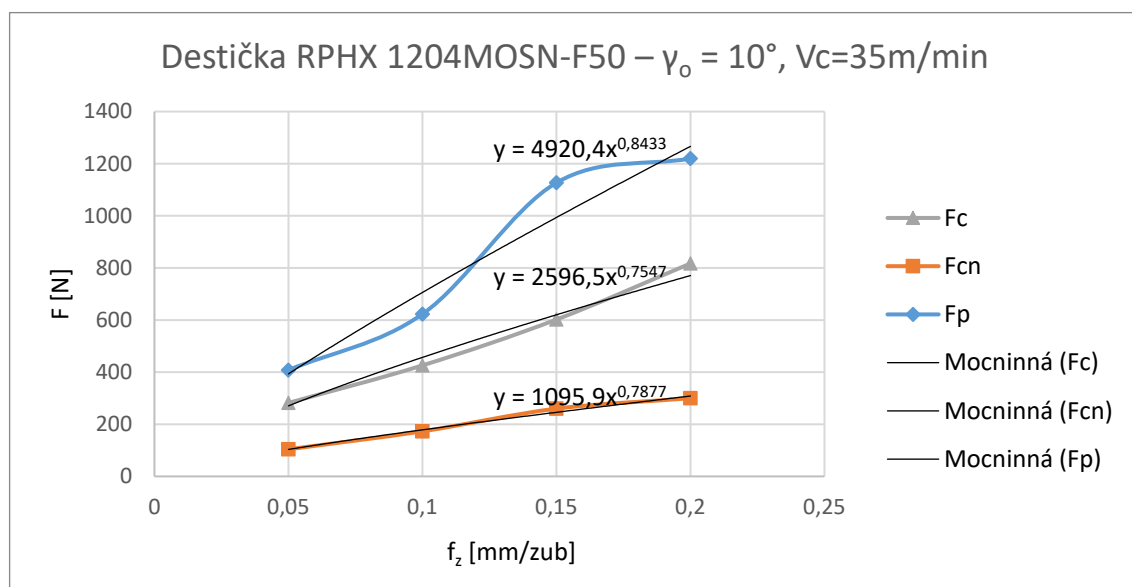
Graf 17 – Závislost normálové síly na rychlosti a posuvu při obrábění s úhlem $\gamma_o = 10^\circ$



Graf 18 – Závislost pasivní síly na rychlosti a posuvu při obrábění s úhlem $\gamma_o = 10^\circ$

U tohoto měření byla použita destička s úhlem čela 18° s povlakem PVD. Vlivem držáku destiček, který má úhel $\gamma_o' = -8^\circ$ je výsledný úhel $\gamma_o = 10^\circ$.

V tabulce 14 a v grafech 16, 17 a 18 jsou zobrazené naměřené hodnoty sil při frézování s úhlem čela $\gamma_o = 10^\circ$. Na zobrazených grafech je viditelná změna jednotlivých složek sil v závislosti na řezné rychlosti a posuvu. Dále je patrné, že změna rychlosti nemá výrazný vliv síly. Oproti tomu změna posuvu velmi podstatně mění naměřené hodnoty sil přímou úměrou. Z grafů také vyplývá, že nejnižší řezné síly jsou při obrábění rychlosti okolo 55 m/min. Normálové a pasivní síly jsou pak nejnižší při rychlostech 35 m/min. Pasivní síla je při vyšších rychlostech a větších posuvech neúměrně velká. To může být dáno i vlivem opotřebení VBD, které je popsáno už u vyhodnocení předchozího měření.

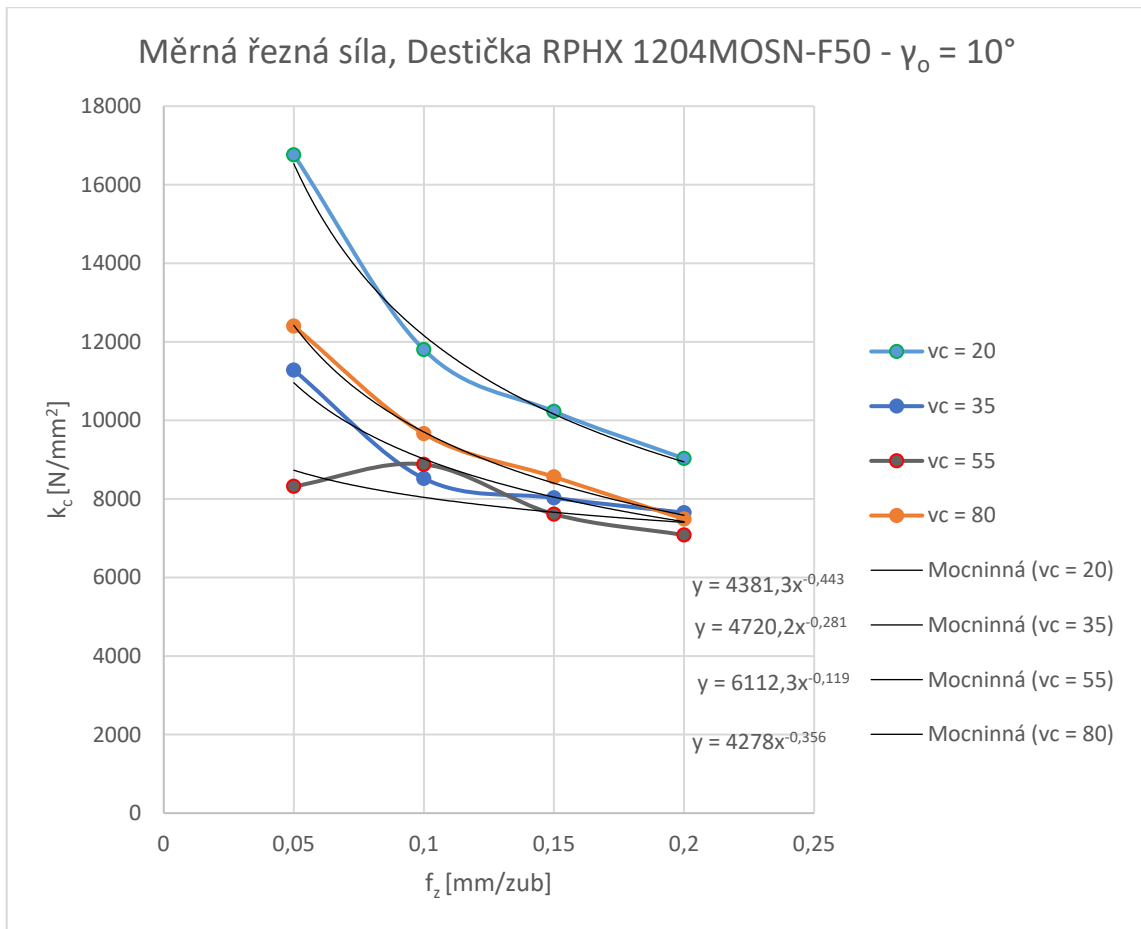


Graf 19 – Závislost jednotlivých silových složek na posuvu při řezné rychlosti 35 m/min

Z předchozích případů zkoumání víme, že nevhodnější řezná rychlost je pro Inconel právě kolem 35 m/min. Výsledky měření však ukazují, že nejmenší řezné síly jsou kolem řezné rychlosti 55 m/min. Ovšem ostatní dvě složky sil (pasivní a normálová) nabývají nejnižších hodnot právě kolem rychlosti 35 m/min. Odborníci specializující se na obrábění komponentů pro výrobu leteckých motorů z firmy GE Aviation Czech uvádí jako nejlepší řezné rychlosti pro obrábění Inconelu 35 m/min. Výše na grafu 19 můžeme vidět růst jednotlivých složek sil v závislosti na posuvu při řezné rychlosti 35 m/min. Je zde patrné, že síly rostou téměř lineárně, vyjma hodnoty pasivní síly při posuvu 0,15 mm/zub, což mohlo být způsobeno opotřebením břitu destičky, nabalením třísky na břit nebo jinou nesrovnalostí či chybou v měření.

Tab. 15 – Hodnoty měrného řezného odporu pro jednotlivé posuvy

Destička RPHX 1204MOSN-F50 – $\gamma_o = 10^\circ$	k_c [N/mm ²]	f_z [mm/zub]
$v_c = 20$	16760	0,05
	11800	0,1
	10227	0,15
	9030	0,2
$v_c = 35$	11280	0,05
	8520	0,1
	8027	0,15
	7650	0,2
$v_c = 55$	8320	0,05
	8880	0,1
	7613	0,15
	7080	0,2
$v_c = 80$	12400	0,05
	9660	0,1
	8560	0,15
	7490	0,2



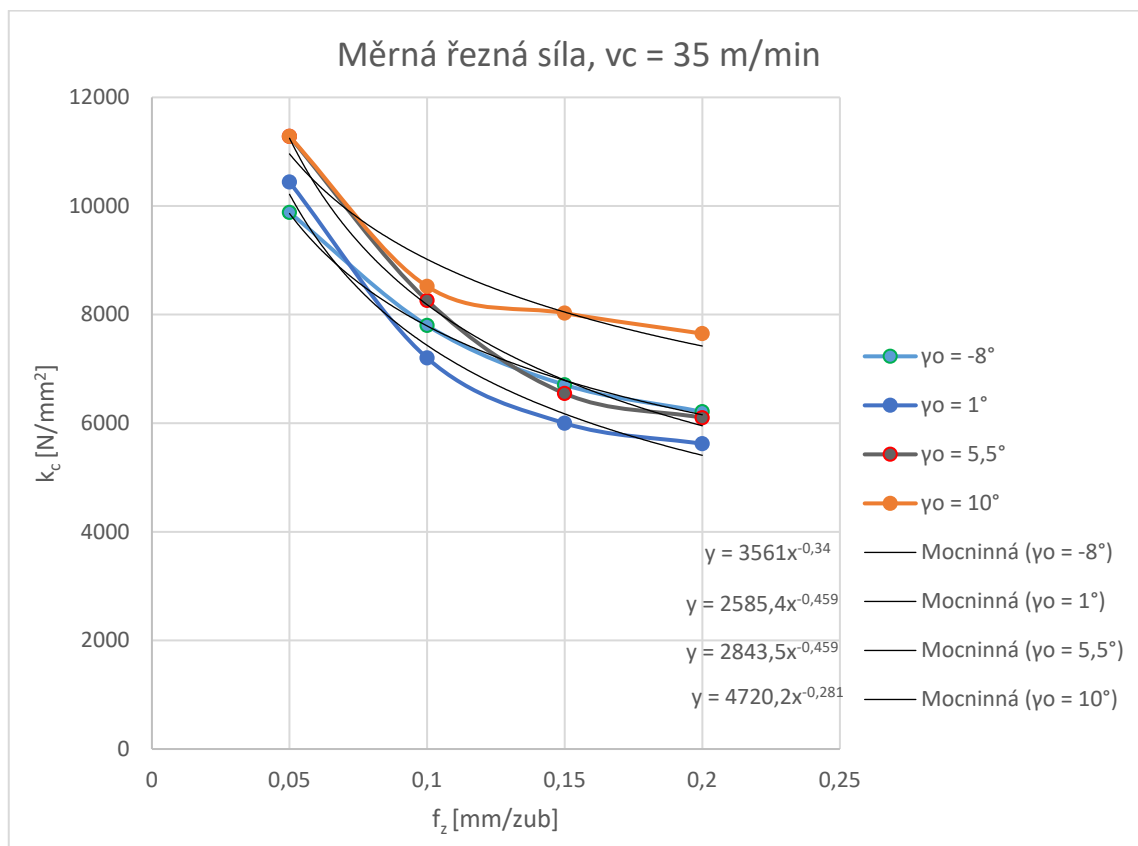
Graf 20 – Závislost měrného řezného odporu na posuvu při obrábění s úhlem $\gamma_o = 10^\circ$

Na grafu 20 jsou znázorněny hodnoty měrného řezného odporu k_c v závislosti na posuvu na zub pro jednotlivé řezné rychlosti při frézování s úhlem $\gamma_o = 10^\circ$. Přesné hodnoty příslušných měrných řezných odporů jsou pak v tabulce 14, která je uvedena nad grafem.

Z grafu je patrné, že při použití této geometrie nástroje nedochází ke zpevňování materiálu. Trend měrné řezné síly je klesající a po proložení křivek mocninnou funkcí je zřejmé, že exponenty jsou záporné díky tomu, že funkce jsou klesající. Při větších posuvech již snižování měrné řezné síly není tak intenzivní.

U řezné rychlosti 55 m/min došlo k vybočení z trendu. Tento jev se dá označit, jako statistická chyba, neboť není důvod, aby právě při těchto podmínkách nějakým způsobem rostla měrná řezná síla. Každopádně by bylo potřeba se tomuto prvku věnovat hlouběji, zda se nejedná o jiný závažný problém.

11.1.4. Porovnání řezných sil a měrných řezných sil pro různé geometrie nástroje při konstantní řezné rychlosti 35 m/min

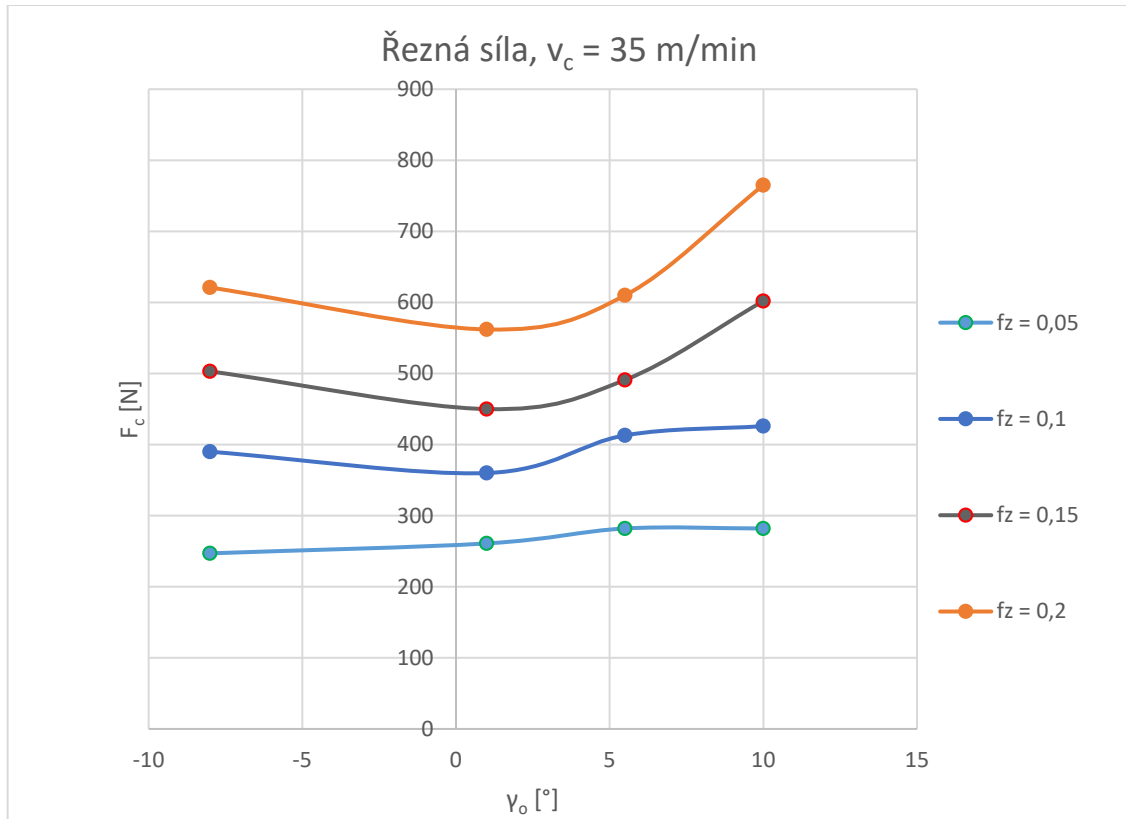


Graf 21 – Závislost měrné řezné síly na posuvu pro různé geometrie nástroje pro řeznou rychlost 35 m/min

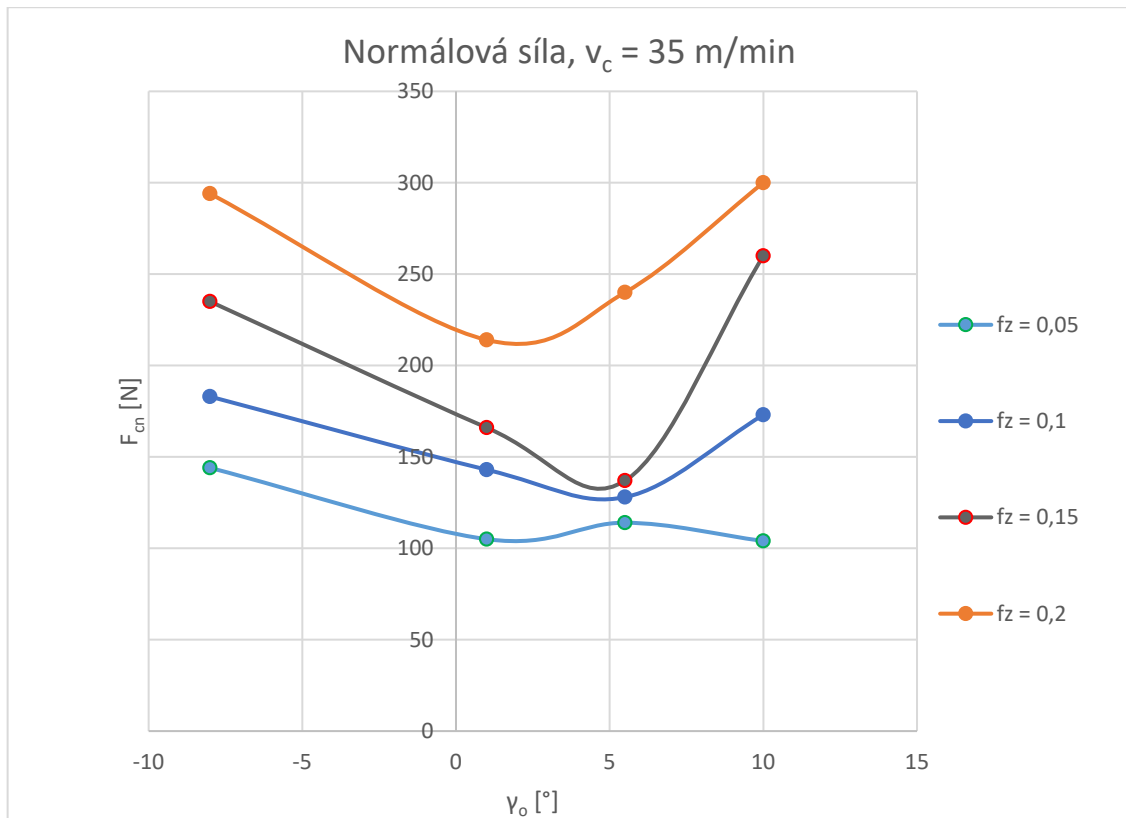
Z grafu 21 je možné vypočítat změny měrných řezných sil v závislosti na posuvu při konstantní řezné rychlosti 35 m/min. Je patrné, že se mocninné funkce pro jednotlivé geometrie liší. Pro úhly čela $\gamma_o = 1^\circ$ a $\gamma_o = 5,5^\circ$ jsou konstanty podobné a exponenty dokonce totožné. Jejich hodnota je -0,46. Vzhledem k největším záporným hodnotám exponentů je patrné, že měrná řezná síla u těchto geometrií klesá nejrychleji. Hůře je na tom nástroj s úhlem čela $\gamma_o = -8^\circ$. Mocninná funkce pro tuto geometrii má exponent pouze -0,34, což je stále vyšší než při obrábění s úhlem čela $\gamma_o = 10^\circ$. Při této geometrii je exponent roven -0,28. Shrnuté rovnice měrných řezných sil pro jednotlivé geometrie jsou shrnuty v tabulce 16.

Tab. 16 – Mocninné funkce pro výpočet měrných řezných sil

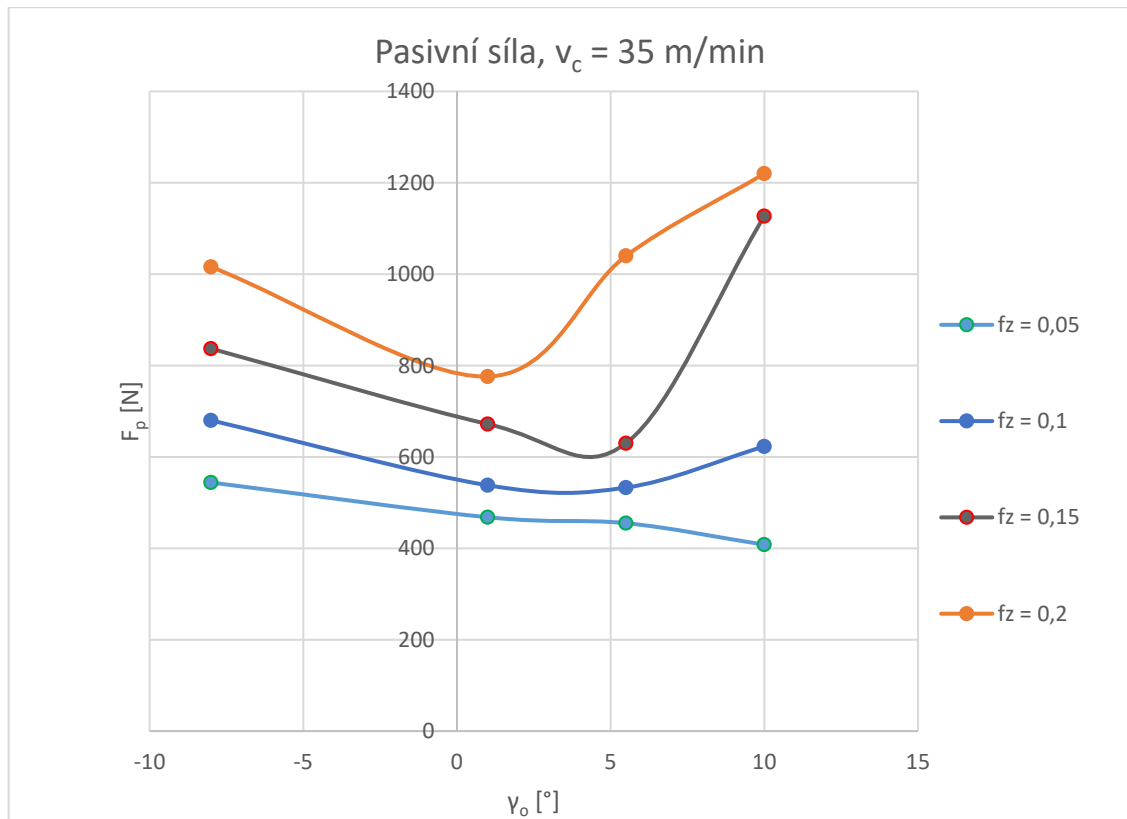
Úhel čela γ_o	Funkce
$\gamma_o = -8^\circ$	$k_c = 3561 \cdot f_z^{-0,34}$
$\gamma_o = 1^\circ$	$k_c = 2585 \cdot f_z^{-0,46}$
$\gamma_o = 5,5^\circ$	$k_c = 2844 \cdot f_z^{-0,46}$
$\gamma_o = 10^\circ$	$k_c = 4720 \cdot f_z^{-0,28}$



Graf 22 – Závislost řezné síly F_c na úhlu čela γ_o



Graf 23 – Závislost normálové síly F_{cn} na úhlu čela γ_o



Graf 24 – Závislost pasivní síly F_p na úhlu čela γ_o

Na grafech 22, 23 a 24 jsou znázorněny závislosti jednotlivých složek sil na úhlu čela γ_o . Ze závislosti jasně vyplývá, že všechny složky sil mají nejnižší hodnoty mezi $\gamma_o = 1^\circ$ až $\gamma_o = 5,5^\circ$. Z této skutečnosti lze dedukovat, že nejpříjemnější geometrie vzhledem k silovému zatížení pro obrábění této slitiny niklu je někde mezi těmito hodnotami.

Toto tvrzení potvrzuje i fakt, že pro tyto geometrie jsou mocninné funkce měrných řezných sil s nejmenším exponentem (popř. s exponentem nabývajícím největších záporných hodnot).

11.1.5. Závěrečné hodnocení měření sil

Z výše uvedených hodnot experimentu vyplývá, že pro obrábění slitiny niklu Inconel 713 LC je nejvýhodnější řezná rychlost 35 m/min. Při této rychlosti jsou nejmenší síly a jednotlivé složky rostou téměř lineárně při zvětšování posuvu.

Dále je zřejmé, že nejvhodnější úhel čela γ_o se pohybuje mezi hodnotami 1° až $5,5^\circ$. Ve zjištěné oblasti jsou hodnoty jednotlivých složek sil nejmenší, a to při všech posuvech. Při těchto geometriích také vyšel nejmenší exponent u mocninných funkcí měrných řezných sil, kdy exponenty byli kolem -0,46, což je hodnota vyšší než u ocelí. Jedná se o výsledek, který odpovídá teoretickým předpokladům.

11.2. Měření drsnosti

Drsnost obrobených ploch byla měřena pomocí mobilního drsnoměru MarSurf PS 10 od firmy Mahr. Měření bylo provedeno pro všechny řezné podmínky u všech použitých geometrií nástroje.

11.2.1. Postup měření drsností

Pro získání dobrého výsledku je u ručního drsnoměru důležité přesné ustavení vzhledem k měrné ploše, a proto bylo provedeno pět měření. Nejvyšší a nejnižší hodnota nebyla brána v potaz a ze zbývajících tří hodnot se následně spočítal aritmetický průměr. Z normy ČSN EN ISO 4287 byly zvoleny parametry měření. Délka l_r byla stanovena 0,8 mm. Z toho vyplývá že celková délka vyhodnocovaného profilu byla 4 mm a s rozběhovou a doběhovou dráhou byla celková dráha hrotu 4,8 mm. Rychlost pohybu hrotu byla 1 mm/s a počet snímaných bodů byl 9600. Další parametry jsou uvedeny právě v normě.

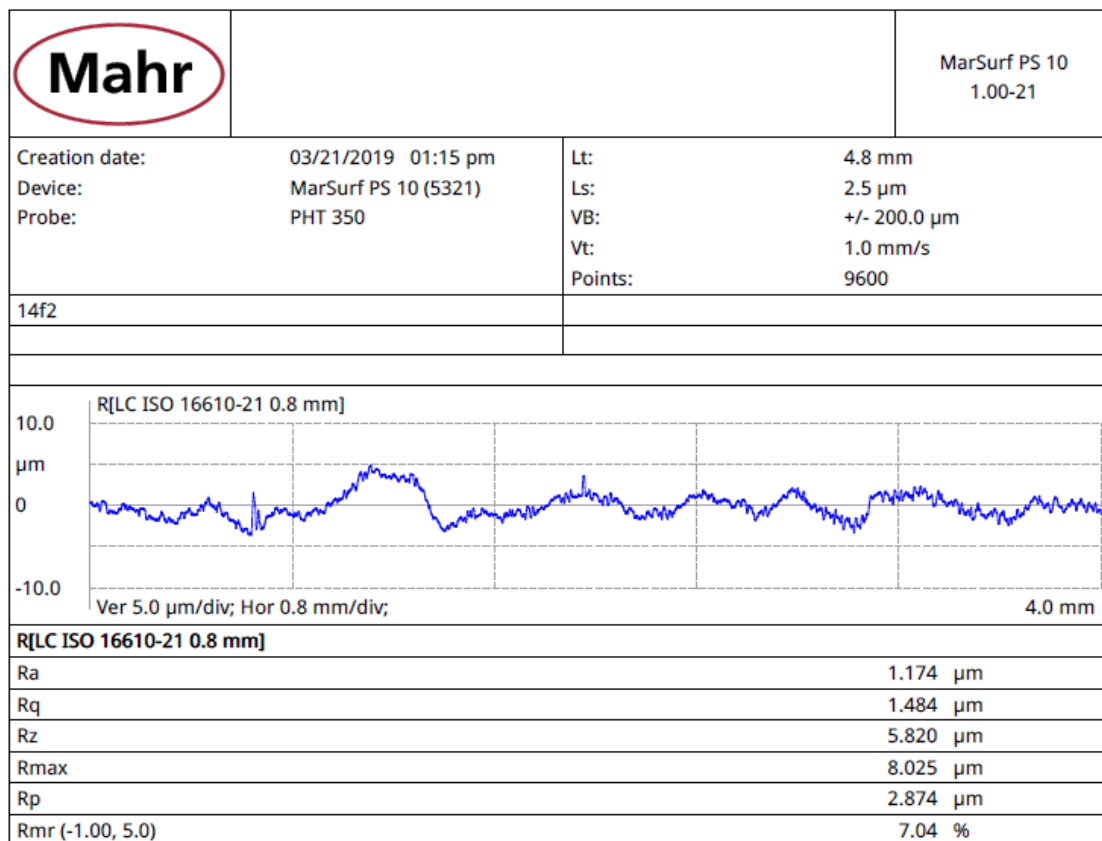
Drsnoměr umí vyhodnocovat velkou škálu parametrů. Pro dobrou představu o samotném profilu byly vybrány tyto parametry:

- R_a - Střední aritmetická úchylka profilu.
- R_q - Kvadratická úchylka profilu.
- R_z - Průměrná hodnota z absolutních hodnot maxim a minim.
- R_{max} - Největší výška profilu.
- R_p - Největší výška výstupku.
- $R_{mr} (-1.00, 5.0)$ - procentuální podíl součtu délek materiálových přímek.



Obr. 38 – Měření drsnosti na obrobeném povrchu

Z každého měření byl následně uložen v přístroji protokol, kde jsou zaznamenány hodnoty jednotlivých parametrů a také vzhled samotného profilu. Příklad tohoto protokolu je na obrázku 39.



Obr. 39 – Protokol z měření drsnosti

11.2.2. Naměřené hodnoty

Tab. 17 – Hodnoty drsností při frézování s úhlem $\gamma_0 = -8^\circ$

Destička ČVUT – $\gamma_0 = -8^\circ$, $V_c = 20$ m/min					Destička ČVUT – $\gamma_0 = -8^\circ$, $V_c = 35$ m/min				
fz [mm/zub]	0,05	0,1	0,15	0,2	fz [mm/zub]	0,05	0,1	0,15	0,2
Ra [μm]	0,536	0,802	1,151	1,063	Ra [μm]	0,639	1,227	1,694	1,04
Rq [μm]	0,705	1,025	1,442	1,31	Rq [μm]	0,842	1,708	1,97	1,329
Rz [μm]	3,277	5,119	6,888	6,104	Rz [μm]	3,22	8,003	8,237	6,172
Rmax [μm]	4,932	6,507	8,483	6,576	Rmax [μm]	4,855	13,421	9,442	6,846
Rp [μm]	1,648	2,521	3,18	3,188	Rp [μm]	1,61	8,552	3,45	2,562
Rmr1 [%]	41,07	21,88	18,89	20,18	Rmr1 [%]	33,28	15,37	29,85	25,24
Destička ČVUT – $\gamma_0 = -8^\circ$, $V_c = 55$ m/min									
fz [mm/zub]	0,05	0,1	0,15	0,2					
Ra [μm]	0,551	0,692	1,097	1,433					
Rq [μm]	0,903	1,04	1,397	1,954					
Rz [μm]	3,105	4,482	6,486	9,176					
Rmax [μm]	7,004	8,738	10,774	16,065					
Rp [μm]	1,547	2,845	3,241	5,528					
Rmr1 [%]	15,93	22,02	20,79	14,00					

Tab. 18 - Hodnoty drsností při frézování s úhlem $\gamma_o = 1^\circ$

Destička RPHX 1204MOEN-M30 – $\gamma_o = 1^\circ$, Vc = 20 m/min					Destička RPHX 1204MOEN-M30 – $\gamma_o = 1^\circ$, Vc = 35 m/min				
fz [mm/zub]	0,05	0,1	0,15	0,2	fz [mm/zub]	0,05	0,1	0,15	0,2
Ra [μm]	0,683	0,838	0,687	1,171	Ra [μm]	1,007	0,82	0,623	0,598
Rq [μm]	0,868	1,166	0,965	1,444	Rq [μm]	1,347	1,126	1,134	0,798
Rz [μm]	3,768	4,936	4,425	6,282	Rz [μm]	6,591	4,518	3,616	3,126
Rmax [μm]	5,617	9,143	9,106	7,739	Rmax [μm]	11,452	7,569	10,373	5,212
Rp [μm]	1,893	2,252	2,306	3,005	Rp [μm]	3,975	2,339	1,807	1,539
Rmr1 [%]	38,42	33,53	24,92	25,24	Rmr1 [%]	19,77	29,27	28,03	32,38
Destička RPHX 1204MOEN-M30 – $\gamma_o = 1^\circ$, Vc = 55 m/min					Destička RPHX 1204MOEN-M30 – $\gamma_o = 1^\circ$, Vc = 80 m/min				
fz [mm/zub]	0,05	0,1	0,15	0,2	fz [mm/zub]	0,05	0,1	0,15	0,2
Ra [μm]	0,694	0,558	0,803	0,492	Ra [μm]	1,300	0,994	0,503	0,602
Rq [μm]	1,072	0,693	1,042	0,623	Rq [μm]	1,710	1,530	0,644	0,774
Rz [μm]	4,735	3,398	4,735	3,113	Rz [μm]	7,819	8,253	3,491	3,495
Rmax [μm]	8,315	4,136	6,153	3,979	Rmax [μm]	9,32	15,708	3,826	5,065
Rp [μm]	3,099	1,606	2,464	1,406	Rp [μm]	4,401	5,209	1,442	1,94
Rmr1 [%]	15,96	52	13,54	58,86	Rmr1 [%]	9,19	16,7	64,7	27,37

Tab. 19 - Hodnoty drsností při frézování s úhlem $\gamma_o = 5,5^\circ$

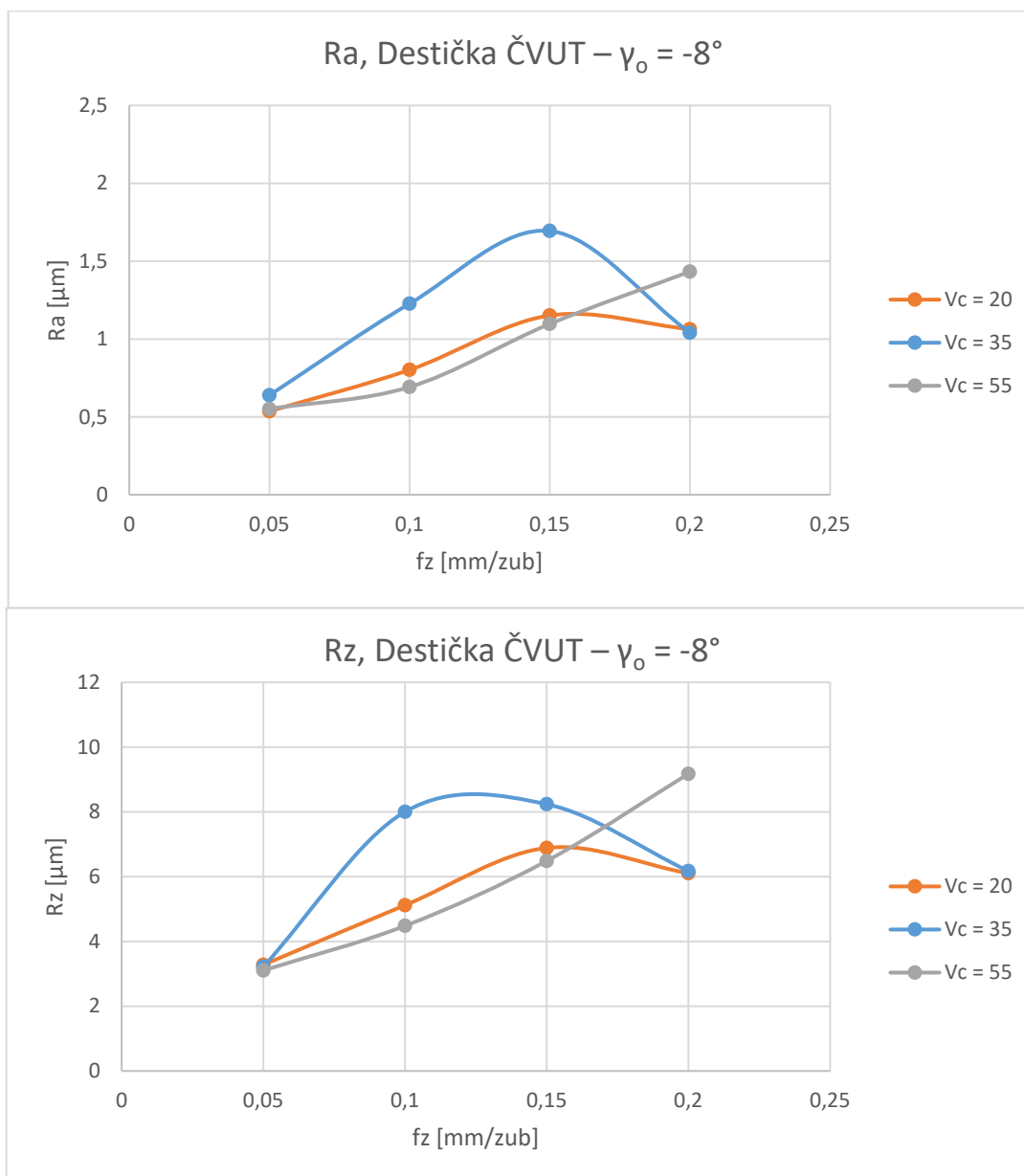
Destička RPHX 1204MOSN-M50 – $\gamma_o = 5,5^\circ$, Vc = 20 m/min					Destička RPHX 1204MOSN-M50 – $\gamma_o = 5,5^\circ$, Vc = 35 m/min				
fz [mm/zub]	0,05	0,1	0,15	0,2	fz [mm/zub]	0,05	0,1	0,15	0,2
Ra [μm]	0,431	0,649	0,696	1,147	Ra [μm]	0,352	0,338	0,497	0,414
Rq [μm]	0,556	0,824	0,895	1,566	Rq [μm]	0,469	0,425	0,606	0,521
Rz [μm]	2,898	4,058	3,866	7,314	Rz [μm]	2,607	2,266	3,06	2,712
Rmax [μm]	3,235	5,731	5,011	15,13	Rmax [μm]	3,708	2,767	3,843	3,457
Rp [μm]	1,632	2,01	1,783	3,456	Rp [μm]	1,222	1,14	1,748	1,251
Rmr1 [%]	59,14	34,02	30,34	11,17	Rmr1 [%]	77,72	72,63	49,05	61,19
Destička RPHX 1204MOSN-M50 – $\gamma_o = 5,5^\circ$, Vc = 55 m/min					Destička RPHX 1204MOSN-M50 – $\gamma_o = 5,5^\circ$, Vc = 80 m/min				
fz [mm/zub]	0,05	0,1	0,15	0,2	fz [mm/zub]	0,05	0,1	0,15	0,2
Ra [μm]	0,628	0,584	0,675	0,599	Ra [μm]	0,623	0,826	0,642	1,289
Rq [μm]	0,882	0,793	0,832	0,74	Rq [μm]	0,790	1,084	0,81	1,683
Rz [μm]	3,502	3,263	4,221	3,619	Rz [μm]	3,769	4,943	3,994	7,064
Rmax [μm]	6,01	5,443	4,765	4,329	Rmax [μm]	4,071	7,53	5,606	9,874
Rp [μm]	2,122	1,67	2,224	1,705	Rp [μm]	1,636	2,743	1,71	3,886
Rmr1 [%]	12,77	31,15	23,58	43,25	Rmr1 [%]	41,38	38,03	36,29	10,94



Tab. 20 - Hodnoty drsností při frézování s úhlem $\gamma_0 = 10^\circ$

Destička RPHX 1204MOSN-F50 – $\gamma_0 = 10^\circ$, Vc = 20 m/min					Destička RPHX 1204MOSN-F50 – $\gamma_0 = 10^\circ$, Vc = 35 m/min				
fz [mm/zub]	0,05	0,1	0,15	0,2	fz [mm/zub]	0,05	0,1	0,15	0,2
Ra [μm]	1,011	0,912	1,05	0,797	Ra [μm]	0,820	0,865	0,763	0,996
Rq [μm]	1,437	1,141	1,361	1,108	Rq [μm]	1,189	1,137	0,979	1,331
Rz [μm]	5,547	5,9	6,914	4,702	Rz [μm]	4,358	4,86	4,91	5,701
Rmax [μm]	7,683	6,671	11,808	9,73	Rmax [μm]	8,319	7,548	7,235	9,063
Rp [μm]	2,888	2,639	3,758	2,699	Rp [μm]	2,533	2,38	2,345	2,805
Rmr1 [%]	8,04	21,56	24,41	14,59	Rmr1 [%]	17,05	25,4	30,74	16,99
Destička RPHX 1204MOSN-F50 – $\gamma_0 = 10^\circ$, Vc = 55 m/min					Destička RPHX 1204MOSN-F50 – $\gamma_0 = 10^\circ$, Vc = 80 m/min				
fz [mm/zub]	0,05	0,1	0,15	0,2	fz [mm/zub]	0,05	0,1	0,15	0,2
Ra [μm]	0,416	1,174	1,22	1,227	Ra [μm]	1,22	1,1814	2,044	1,902
Rq [μm]	0,670	1,484	1,641	1,542	Rq [μm]	2,018	1,713	2,954	2,519
Rz [μm]	2,782	5,82	6,985	7,202	Rz [μm]	8,445	6,865	10,423	9,828
Rmax [μm]	4,557	8,025	9,552	8,229	Rmax [μm]	20,309	15,4	17,794	15,638
Rp [μm]	1,891	2,874	3,941	3,815	Rp [μm]	5,939	3,787	5,64	6,007
Rmr1 [%]	14,8	7,04	10,35	17,26	Rmr1 [%]	11,35	13,3	7,51	8,33

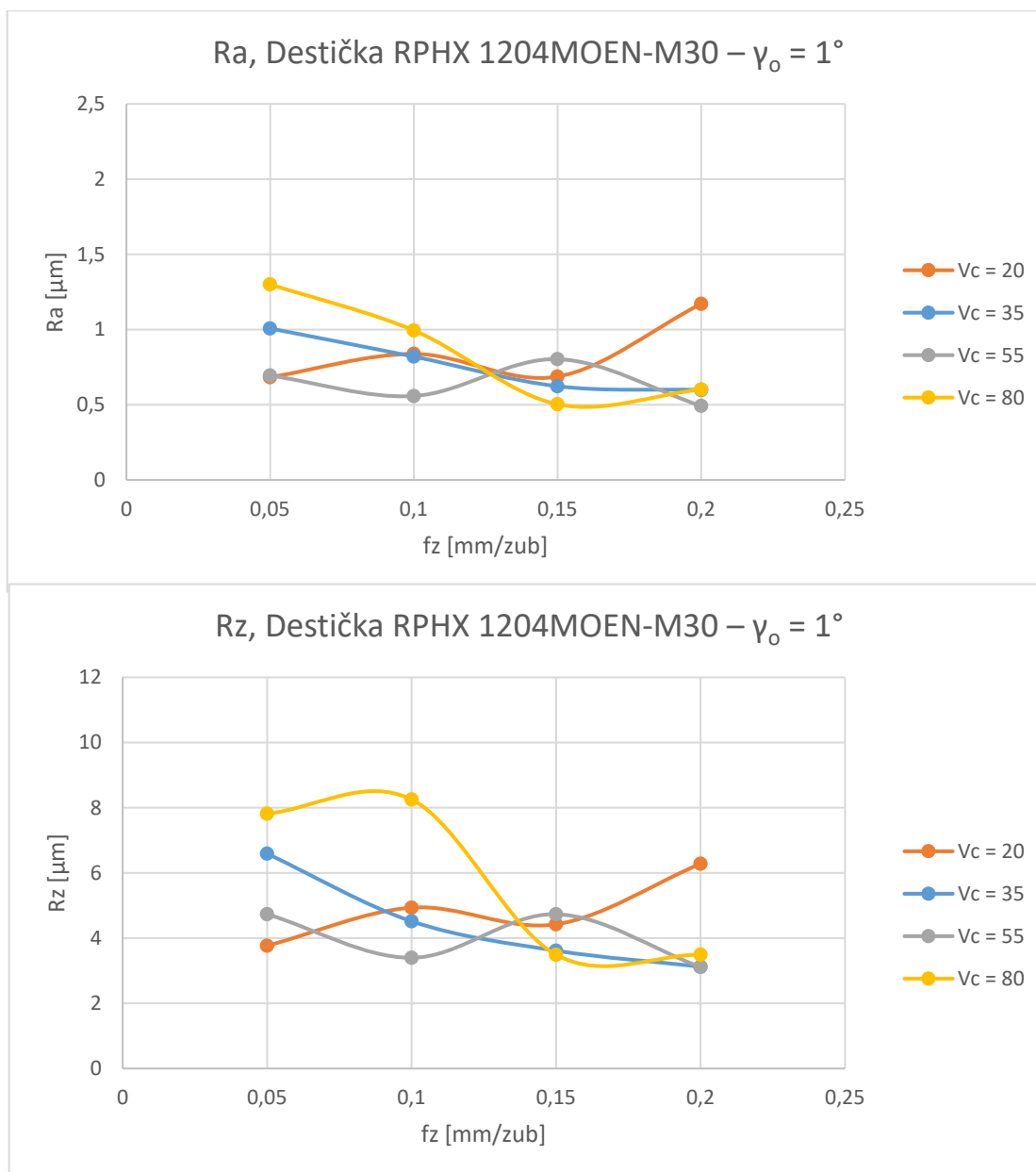
V tabulkách 17, 18, 19 a 20 jsou uvedeny hodnoty měřených parametrů drsností u různých úhlech čela γ_0 při jednotlivých řezných rychlostech a posuvech. Každý parametr vypovídá o mikrogeometrii povrchu něco jiného. Vzhledem k velkému množství dat a velkému množství potenciačních kombinací vyhodnocení byly brány v potaz jen parametry Ra a Rz, které nejvíce vypovídají o vlastnostech mikrogeometrie a v technické praxi jsou používány nejčastěji.



Graf 25 – Závislost parametrů Ra a Rz na posuvu při jednotlivých řezných rychlostech

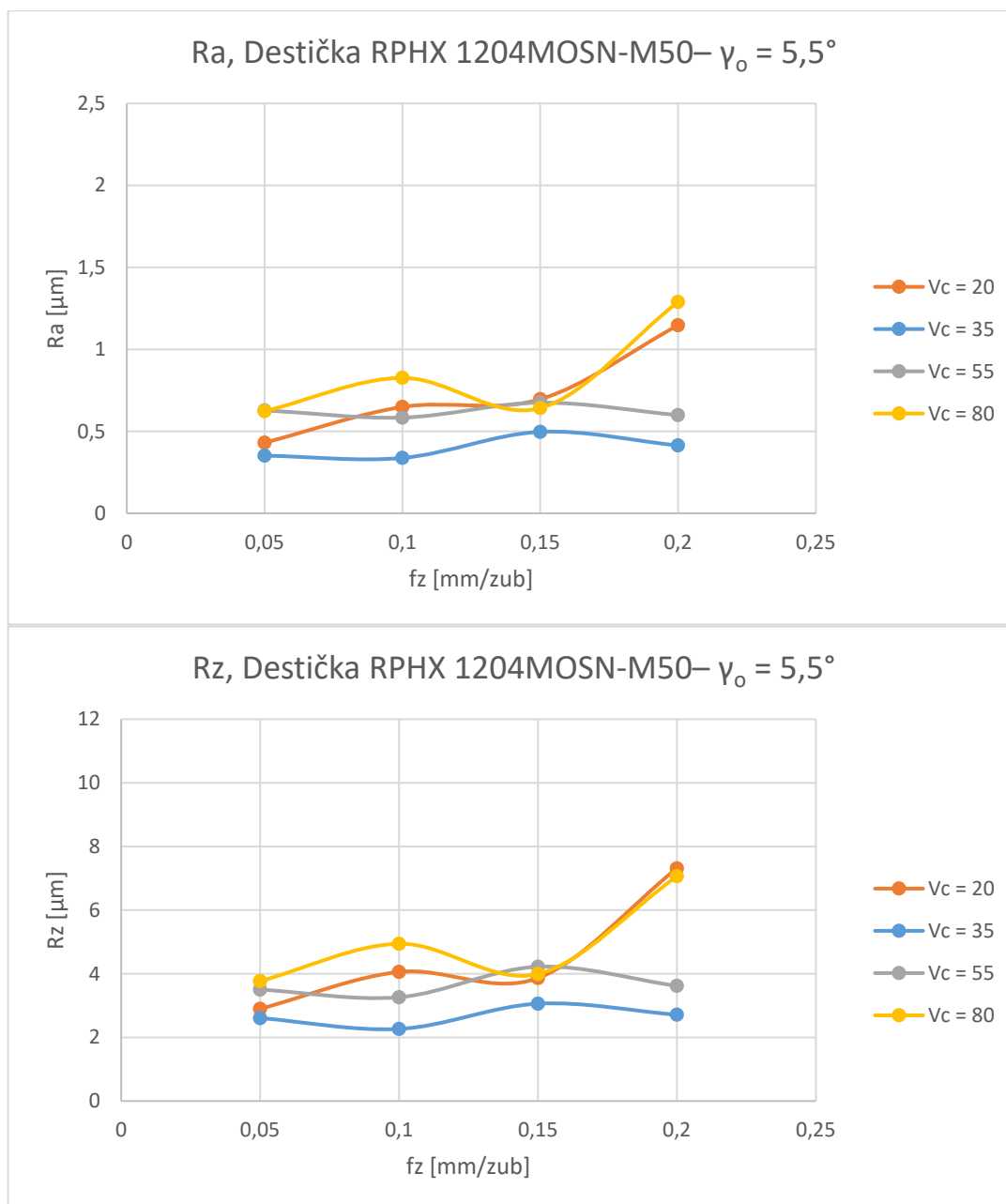
Na grafu 25 je zobrazena závislost drsnosti na posuvu pro jednotlivé řezné rychlosti při frézování pomocí destičky ČVUT s úhlem čela $\gamma_0 = -8^\circ$. Lze zde vidět, že při zvětšujícím se posuvu rostou i oba parametry drsnosti. Při menších rychlostech však od posuvu 0,15 mm/zub drsnost klesá. Tento jev může být dán opotřebením řezné hrany a následným zvětšením oblasti primární plastické deformace.

U rychlostí 20 a 35 m/min je patrný pokles drsnosti při posuvu 0,2 mm/z. Tento jev může být dán opotřebením nástroje, avšak pro upřesnění této hypotézy by bylo potřeba hlubšího výzkumu.



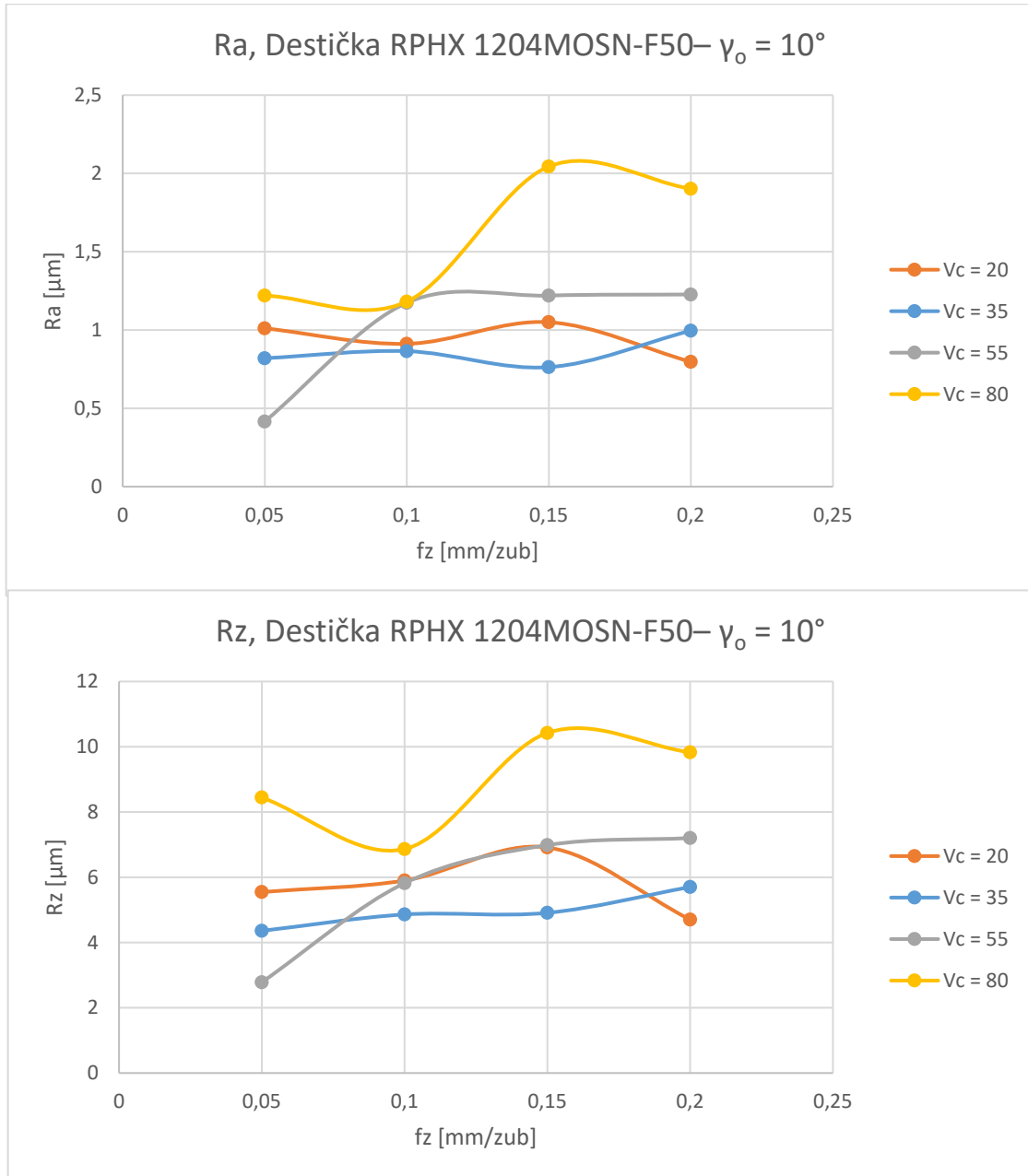
Graf 26 - Závislost parametrů Ra a Rz na posuvu při jednotlivých řezných rychlostech

Na grafu 26 je zobrazena závislost drsnosti na posuvu pro jednotlivé řezné rychlosti při frézování pomocí destičky RPHX 1204MOEN-M30 s úhlem čela $\gamma_0 = 1^\circ$. Je zde patrné, že při rychlostech 35 m/min a vyšší se drsnost snižuje s rostoucím posuvem. To je dáno pravděpodobně vlivem opotřebením břitu a zaoblením hrany. Při rychlosti 20 m/min se drsnost zvětšuje s rostoucím posuvem, což odpovídá teoretickým předpokladům, neboť opotřebením u této rychlosti je relativně malé.



Graf 27 - Závislost parametrů Ra a Rz na posuvu při jednotlivých řezných rychlostech

Na grafu 27 je zobrazena závislost drsnosti na posuvu pro jednotlivé řezné rychlosti při frézování pomocí destičky RPHX 1204MOSN-M50 s úhlem $\gamma_o = 5,5^\circ$. Na grafu je zřejmé, že drsnost při rostoucím posuvu se zhoršuje (zvětšuje), což odpovídá i teoretickým předpokladům. U rychlostí 35 a 55 m/min lze pozorovat propad v drsnosti při posuvu 0,1 mm/zub. Stejný propad lze pozorovat i u rychlostí 20 a 80 m/min při posuvu 0,15 mm/zub. Tyto propady mohou mít celou řadu příčin. Nejpravděpodobnější je statistická chyba. Pro zjištění příčin této nejasnosti bylo potřeba tyto jevy zkoumat ještě hlouběji.

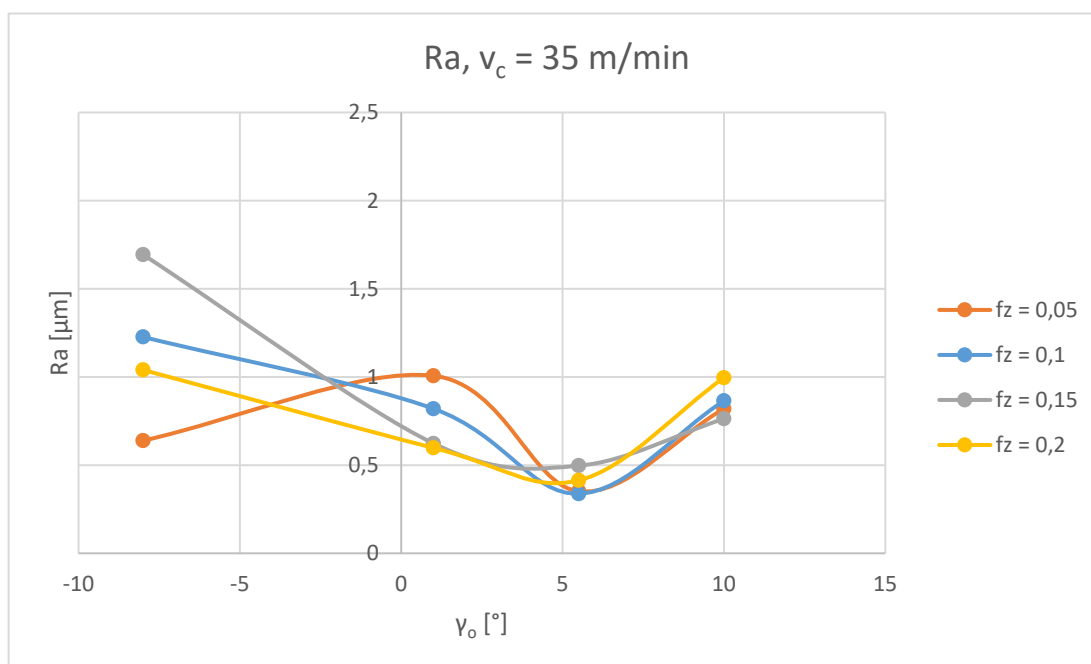


Graf 28 - Závislost parametrů Ra a Rz na posuvu při jednotlivých řezných rychlostech

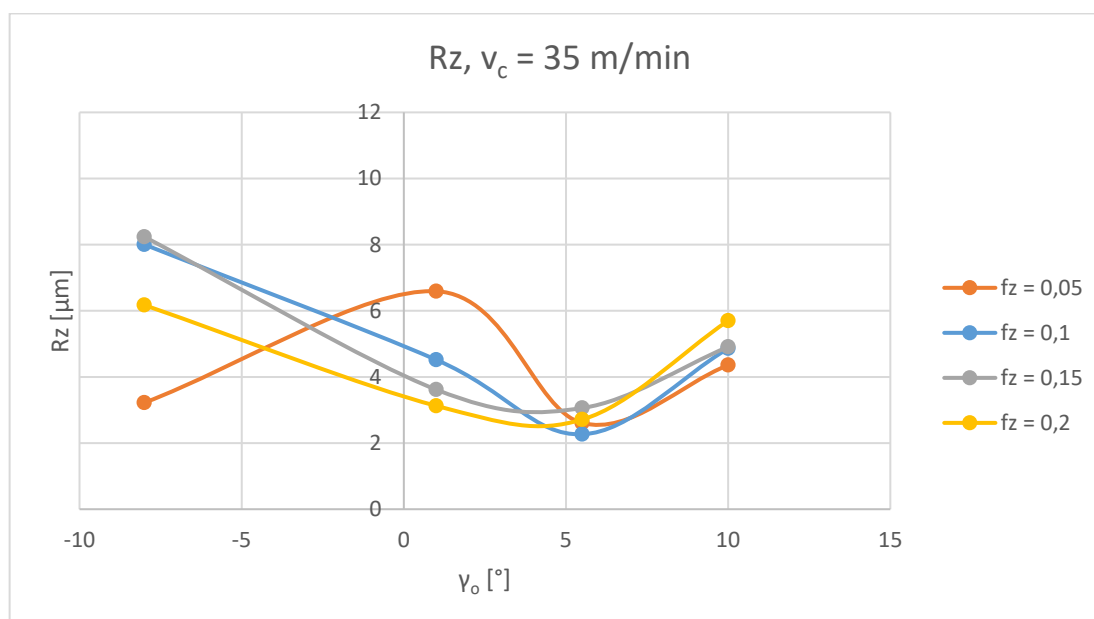
Na grafu 28 je zobrazena závislost drsnosti na posuvu pro jednotlivé řezné rychlosti při frézování pomocí destičky RPHX 1204MOSN-F50 s úhlem $\gamma_o = 10^\circ$. Z výše znázorněného grafu vyplývá, že drsnost roste s rostoucím posuvem. Toto je shodné s teoretickými předpoklady. Dále jsou na grafu vidět jisté odchylky. První odchylka je patrná u rychlosti 80 m/min při posuvu 0,1 mm/zub. To může být dáno nalepením třísky na nástroj a tím pádem se změnila geometrie nástroje. Druhá odchylka je klesání drsnosti při větších posuvech u rychlostí 20 a 80 m/min. Tento jev může vznikat nalepením třísky na nástroj, statistickou chybou, nebo to bude jinou příčinou, která by byla vhodná k dalšímu zkoumání.

11.2.3. Porovnání mikrogeometrie povrchu při různých geometriích nástroje za konstantní řezné rychlosti 35 m/min

Vzhledem k tomu, že již v předešlých experimentech byla určena řezná rychlost 35 m/min jako nejvhodnější, bude porovnání vlivu geometrie na drsnost právě za této rychlosti. Z grafů v předešlé kapitole je navíc patrné, že při této rychlosti jsou nejmenší drsnosti a tudíž nejlepší výsledný povrch po obrobení.



Graf 29 – Parametr drsnosti Ra v závislosti na úhlu čela γ_0 při konstantní řezné rychlosti 35 m/min pro jednotlivé posuvy



Graf 30 – Parametr drsnosti Rz v závislosti na úhlu čela γ_0 při konstantní řezné rychlosti 35 m/min pro jednotlivé posuvy

Na grafech 29 a 30, které jsou zobrazeny výše, je vidět závislost parametrů mikrogeometrie R_a a R_z na úhlu čela γ_o . Z grafů je naprosto zřejmé, že vzhledem ke kvalitě obrobeného povrchu při řezné rychlosti 35 m/min (tato řezná rychlost byla stanovena jako nejvhodnější vzhledem k řezným silám a měrné řezné síly) je nejlepší úhel čela γ_o kolem $5,5^\circ$. Dále se na grafu vyskytuje anomálie v křivkách pro posuv $f_z = 0,05$ mm/zub. Tato anomálie je dána pravděpodobně statistickou odchylkou, nebo nesprávným ustavením drsnoměru při měření.

11.2.4. Závěrečné hodnocení měření drsností

Z výše uvedených hodnot experimentu vyplývá, že pro obrábění slitiny niklu Inconel 713 LC je nejvhodnější řezná rychlost 35 m/min. Při této rychlosti jsou nejmenší parametry drsnosti R_a a R_z .

Dále je vidno, že nejvhodnější úhel čela γ_o se pohybuje kolem hodnoty $5,5^\circ$. Při použití této geometrie za konstantní řezné rychlosti $v_c = 35$ m/min jsou parametry R_a a R_z výrazně nižší než u jiných geometrií nástroje. Parametr R_a se při těchto podmínkách pohybuje v rozmezí 0,3 až 0,5 μm a parametr R_z v rozmezí 2,2 až 3,1 μm . Přesné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 21.

Tab. 21 – Parametry R_a a R_z pro různé posuvy, při řezné rychlosti 35 m/min, úhlu čela $5,5^\circ$

Destička RPHX 1204MOSN-M50 – $\gamma_o = 5,5^\circ$, $v_c = 35$ m/min				
f_z [mm/zub]	0,05	0,1	0,15	0,2
R_a [μm]	0,352	0,338	0,497	0,414
R_z [μm]	2,607	2,266	3,06	2,712

11.3. Opotřebení nástrojů

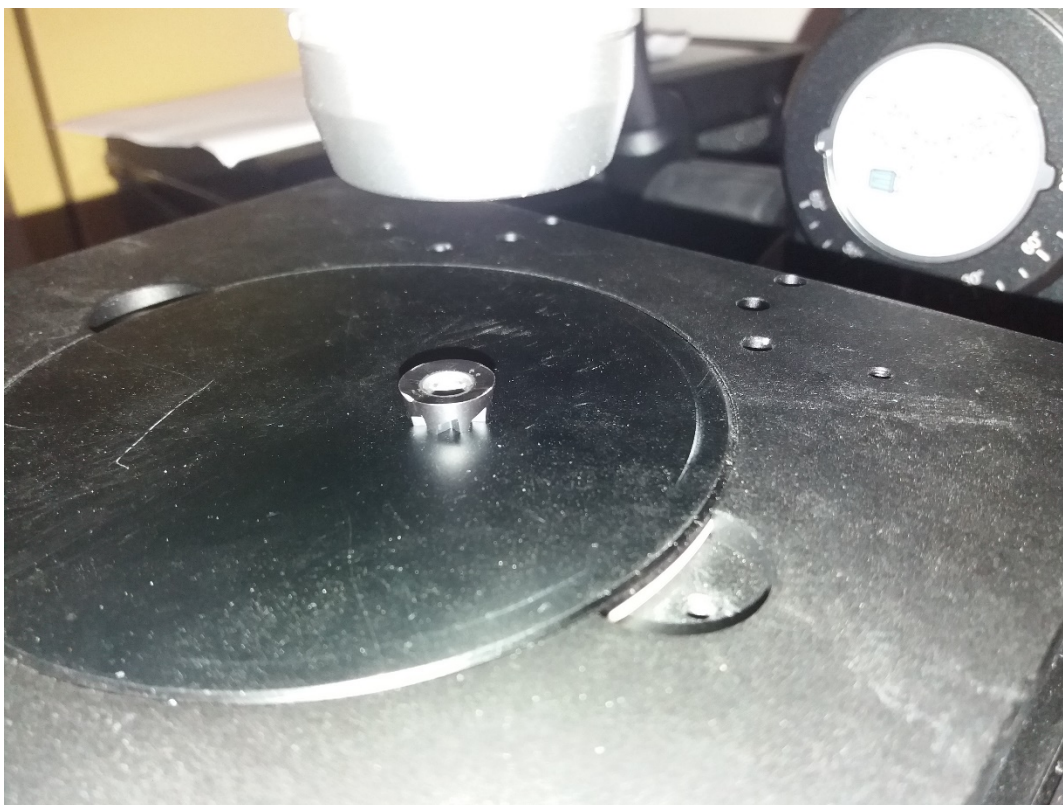
Opotřebení nástrojů hrálo značnou roli při vyhodnocování dalších parametrů. Vlivem velkého opotřebení se značně zvětšují řezné síly a mění se drsnost v závislosti na druhu a velikosti opotřebení. Vzhledem k tomu, že opotřebení nástrojů při obrábění slitin niklu je značné, byla po každém měření destička pootočena a následně na ní bylo změřeno opotřebení na hřbetě a čele.

Orientačně bylo opotřebení změřeno na dílenském mikroskopu, ale tato metoda není moc přesná a ani názorná. Z tohoto důvodu bylo opotřebení na destičkách měřeno na digitálním mikroskopu CHX 6000 od firmy KEYENCE, který měl propojení k PC s příslušným SW od tytéž společnosti.

Postup byl velmi jednoduchý vzhledem k intuitivnímu ovládní mikroskopu. Po umístění destičky byla přiblížena a zaostřena příslušná oblast a pomocí různých funkcí odstraněn odlesk. Následně byl vytvořen snímek potřebných detailů a na tomto snímku bylo provedeno příslušné měření pomocí SW funkcí.

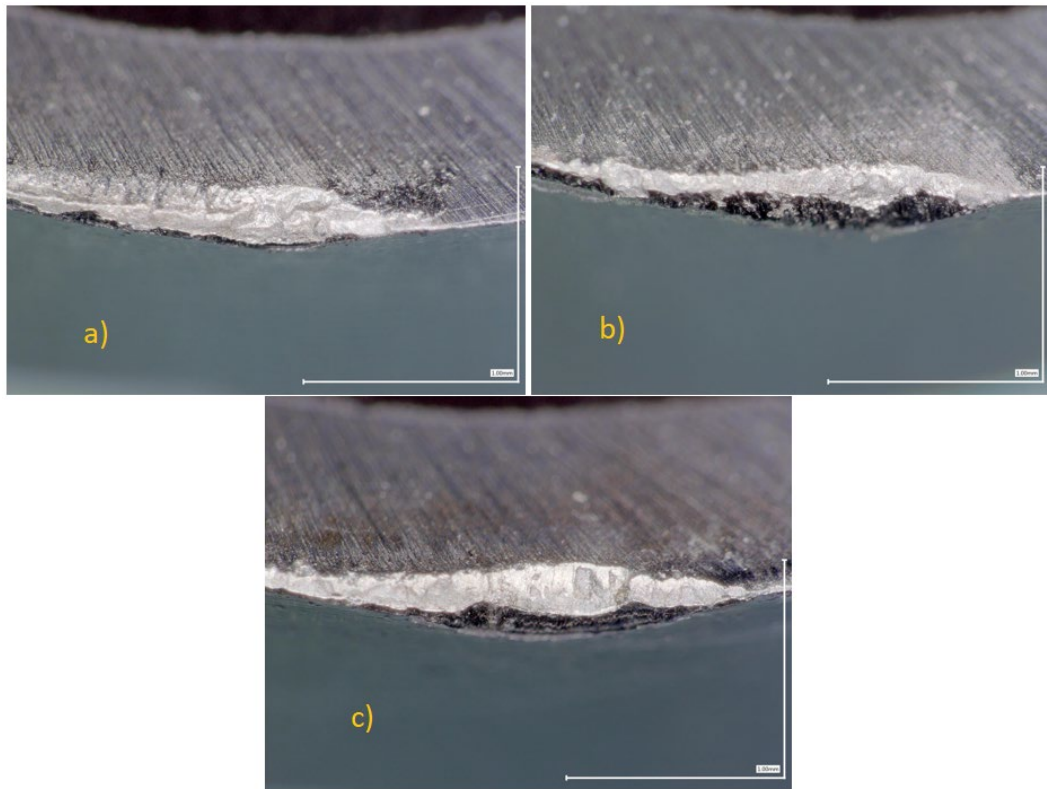


Obr. 40 – Pracoviště digitálního mikroskopu KEYENCE VHX 6000

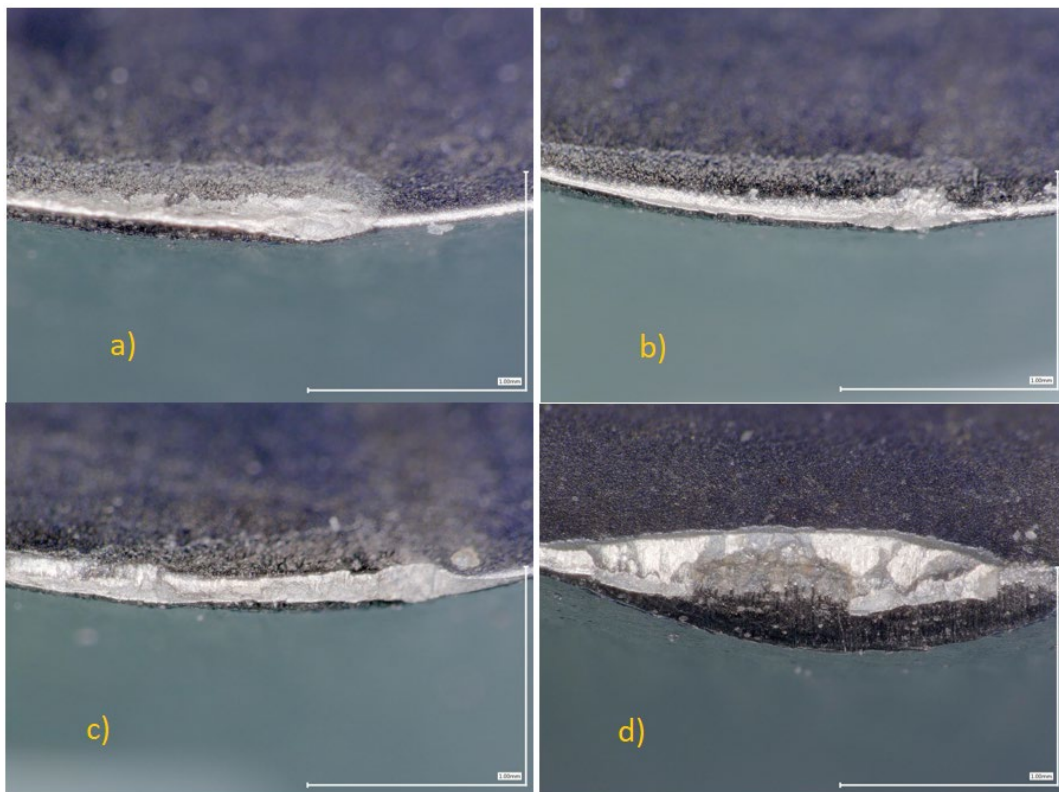


Obr. 41 – Měření destičky na mikroskopu

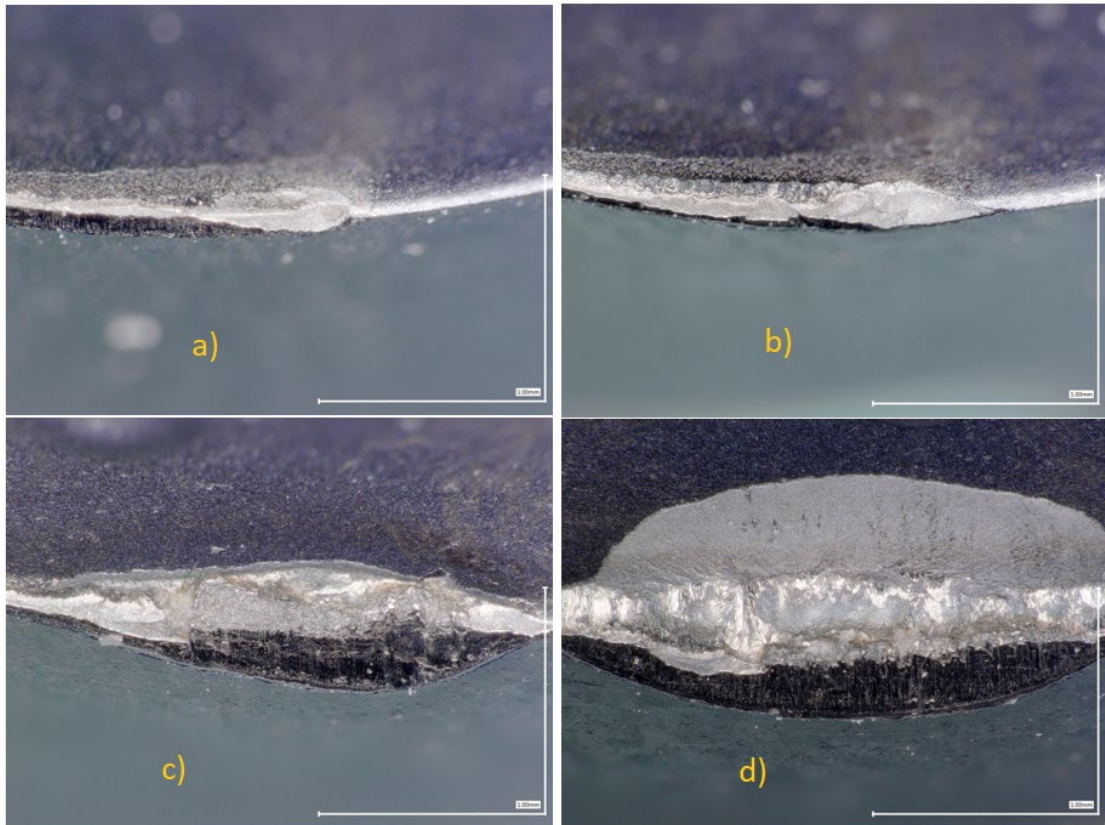
11.3.1. Snímky jednotlivých opotřebení na destičkách



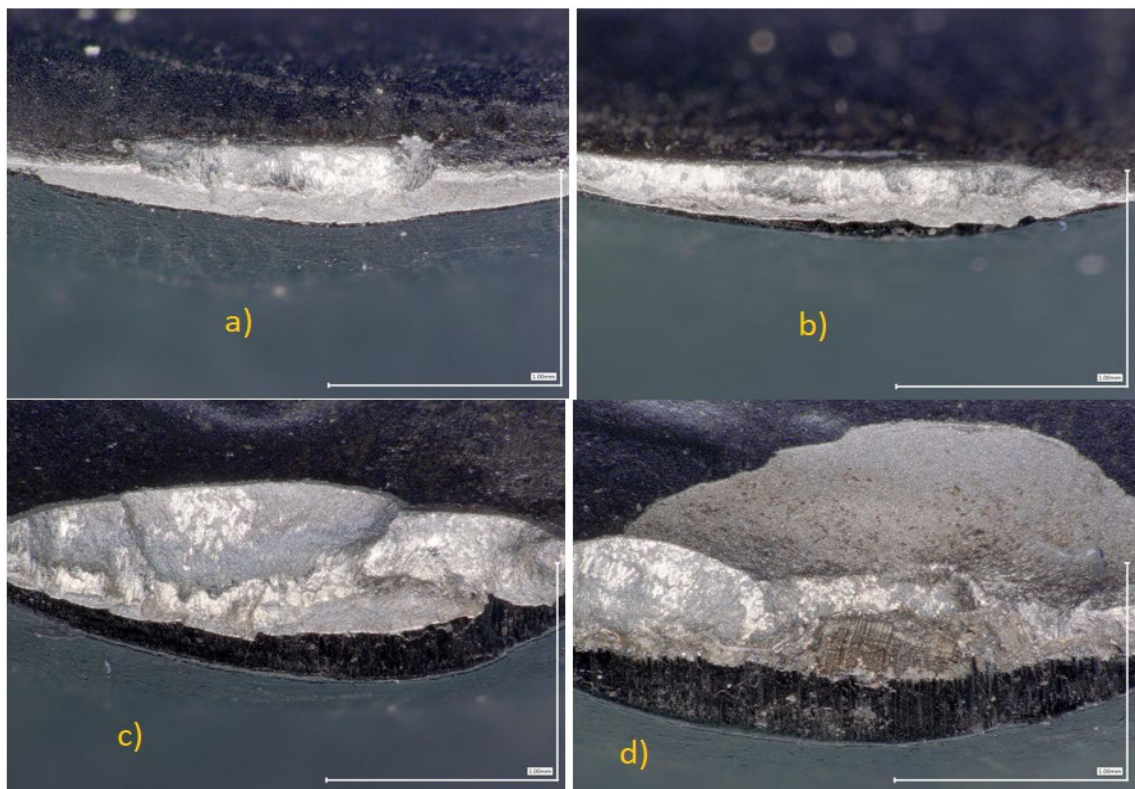
Obr. 42 – Opotřebení destičky pro jednotlivé řezné rychlosti ($\gamma_o = -8^\circ$, zvětšení 150x), a) 20 m/min, b) 35 m/min, c) 55 m/min



Obr. 43 – Opotřebení destičky pro jednotlivé řezné rychlosti ($\gamma_o = 1^\circ$, zvětšení 150x), a) 20 m/min, b) 35 m/min, c) 55 m/min, d) 80 m/min



Obr. 44 – Opotřebení destičky pro jednotlivé řezné rychlosti ($\gamma_o = 5,5^\circ$, zvětšení 150x), a) 20 m/min, b) 35 m/min, c) 55 m/min, d) 80 m/min

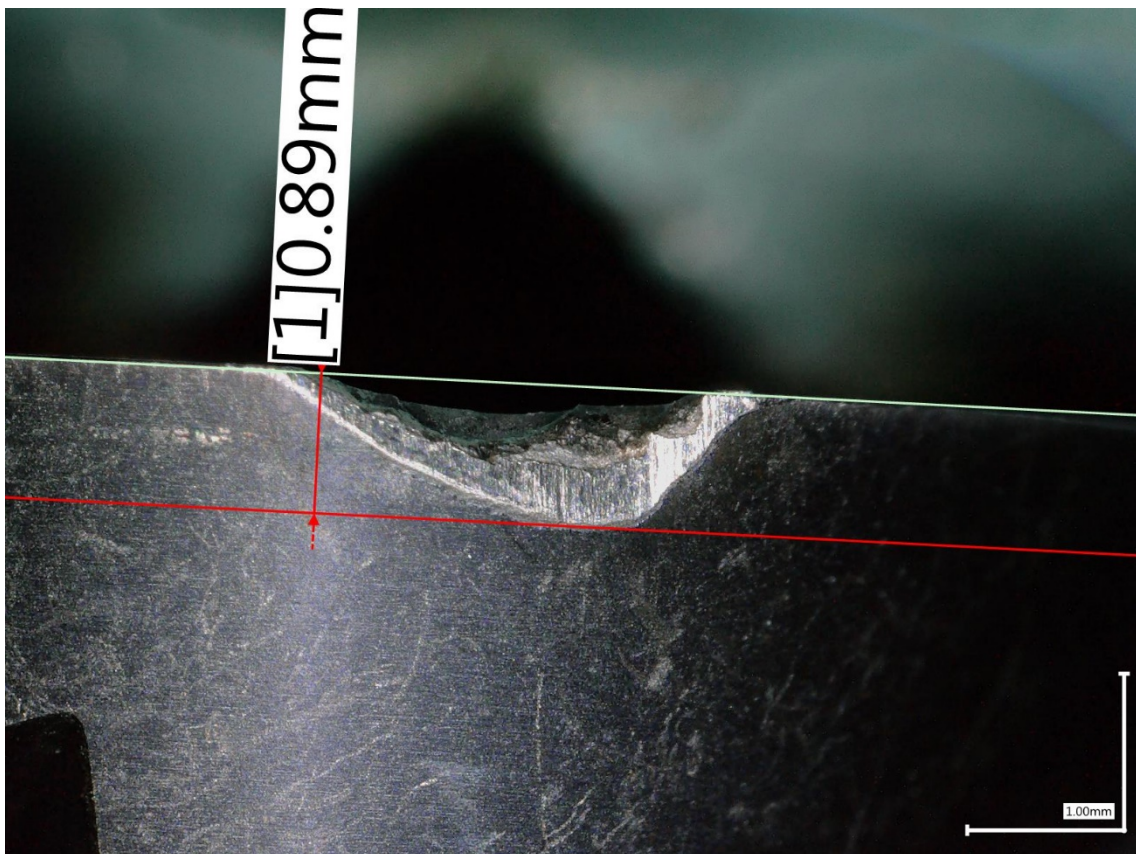


Obr. 45 – Opotřebení destičky pro jednotlivé řezné rychlosti ($\gamma_o = 10^\circ$, zvětšení 150x), a) 20 m/min, b) 35 m/min, c) 55 m/min, d) 80 m/min

Na obrázcích 42 až 45 lze vidět jednotlivé opotřebení na břitových destičkách, při použití jednotlivých řezných sil. Tyto snímky byly pořízeny pomocí digitálního mikroskopu při 150x násobným zvětšením. Je vidět, že u větších řezných rychlostí se nejedná o opotřebení, ale již o destrukci destičky. Ke vzniku tohoto opotřebení dochází pravděpodobně kombinací několika mechanismů. Jedná se zejména o opotřebení abrazivní, adhezní a difuzní, plastickou deformaci a při vyšších rychlostech mnohdy i křehký lom.

11.3.2. Opotřebení na hřbetě

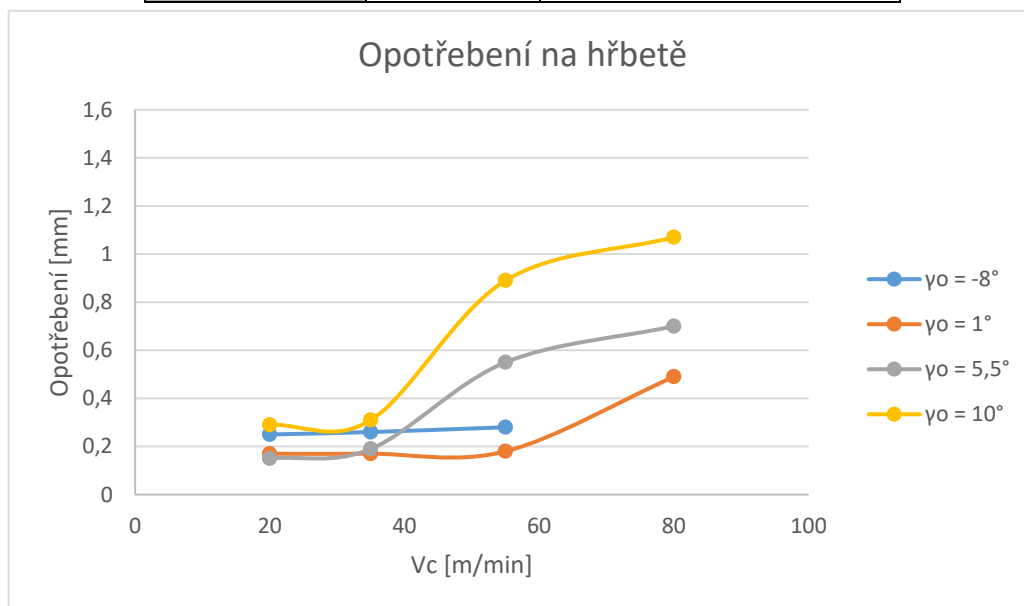
Nejdříve bylo měřeno opotřebení na hřbetu nástroje, které bylo výraznější a začínalo se objevovat již během krátké chvilky. Jak obrábění pokračovalo, tak se opotřebení zvětšovalo a vnášelo pak nesrovnalosti a odchylky v měření sil a drsností. Při vyšších řezných rychlostech byly tyto odchylky větší, neboť opotřebení bylo větší vlivem velkého tepelného zatížení nástroje. Teplo při obrábění bylo při největších rychlostech tak velké, že od obrobku odlétávaly žhavé třísky skoro v plastickém stavu, což by odpovídalo teplotě cca 1400°C.



Obr. 46 – Příklad měření opotřebení na hřbetě pomocí digitálního mikroskopu (zvětšení 50x)

Tab. 22 – Naměřené hodnoty opotřebení na hřbetě pro jednotlivé geometrie a jednotlivé řezné rychlosti

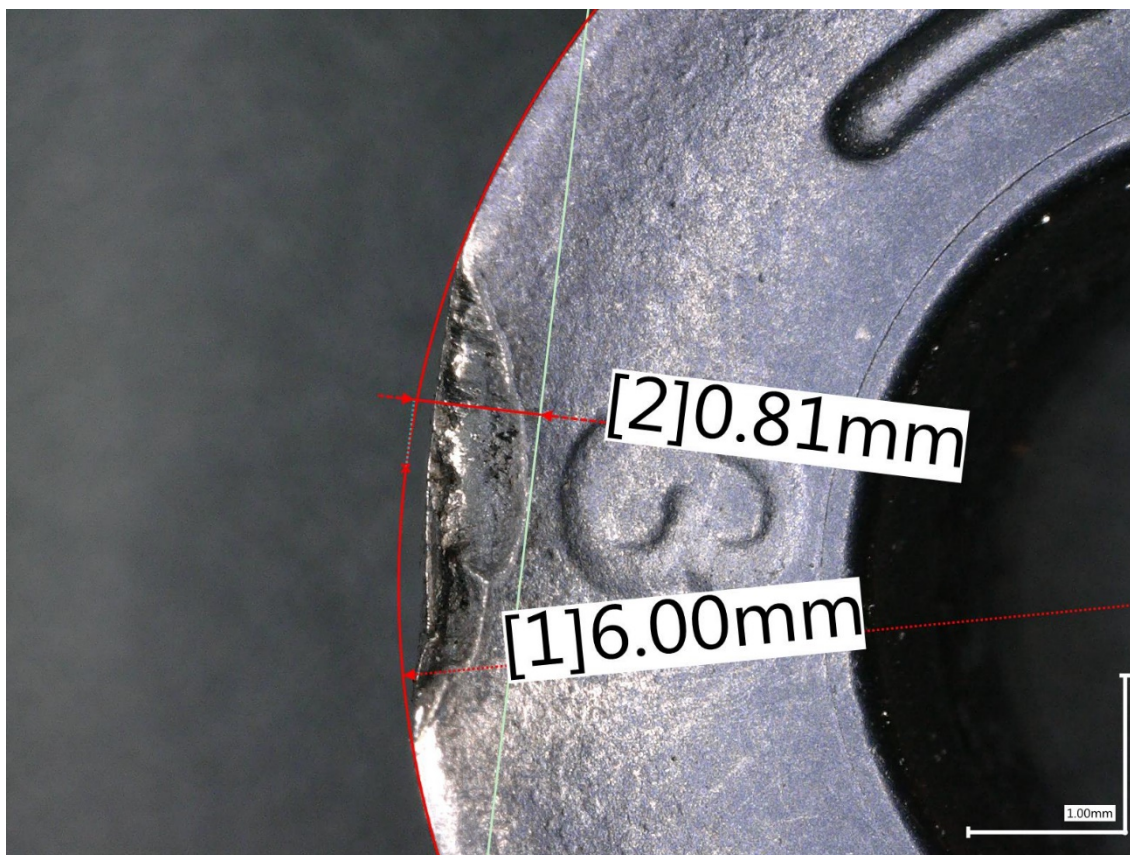
Destička	Vc [m/min]	Opotřebení na hřbetě [mm]
Destička ČVUT $\gamma_o = -8^\circ$	20	0,25
	35	0,26
	55	0,28
Destička RPHX 1204MOEN-M30 $\gamma_o = 1^\circ$	20	0,17
	35	0,17
	55	0,18
	80	0,49
Destička RPHX 1204MOSN-M50 $\gamma_o = 5,5^\circ$	20	0,15
	35	0,19
	55	0,55
	80	0,70
Destička RPHX 1204MOSN-F50 $\gamma_o = 10^\circ$	20	0,29
	35	0,31
	55	0,89
	80	1,07



Graf 31 – Závislost opotřebení nástroje na hřbetě na řezné rychlosti pro jednotlivé geometrie

V grafu 31 je znázorněno opotřebení nástrojů na hřbetě v závislosti na řezné rychlosti. Příslušné naměřené hodnoty jsou pak zaznamenány v tabulce 22. Způsob měření opotřebení na digitálním mikroskopu je znázorněn na obrázku 46. Z naměřených hodnot je patrné, že pro úhly čela -8° a 1° se opotřebení nemění asi do rychlosti 55 m/min. Následuje prudký nárůst opotřebení, což je pravděpodobně dáno velkými teplotami při větších řezných rychlostech. U úhlech čela $5,5^\circ$ a 10° tento nárůst nastává již při rychlostech 35 m/min. To je s největší pravděpodobností způsobeno menším množstvím materiálu v břitu při takto ostrých geometriích.

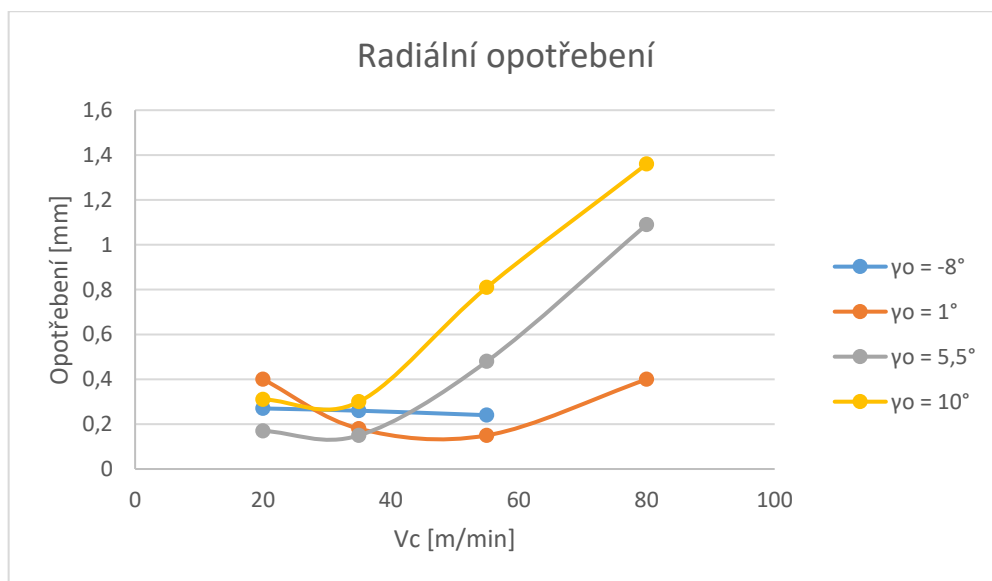
11.3.3. Radiální opotřebení



Obr. 47 – Příklad měření radiálního opotřebení pomocí digitálního mikroskopu (zvětšení 50x)

Tab. 23 – Naměřené hodnoty radiálního opotřebení pro jednotlivé geometrie a jednotlivé řezné rychlosti

Destička	Vc [m/min]	Radiální opotřebení [mm]
Destička ČVUT $\gamma_o = -8^\circ$	20	0,27
	35	0,26
	55	0,24
Destička RPHX 1204MOEN-M30 $\gamma_o = 1^\circ$	20	0,40
	35	0,18
	55	0,15
	80	0,40
Destička RPHX 1204MOSN-M50 $\gamma_o = 5,5^\circ$	20	0,17
	35	0,15
	55	0,48
	80	1,09
Destička RPHX 1204MOSN-F50 $\gamma_o = 10^\circ$	20	0,31
	35	0,30
	55	0,81
	80	1,36

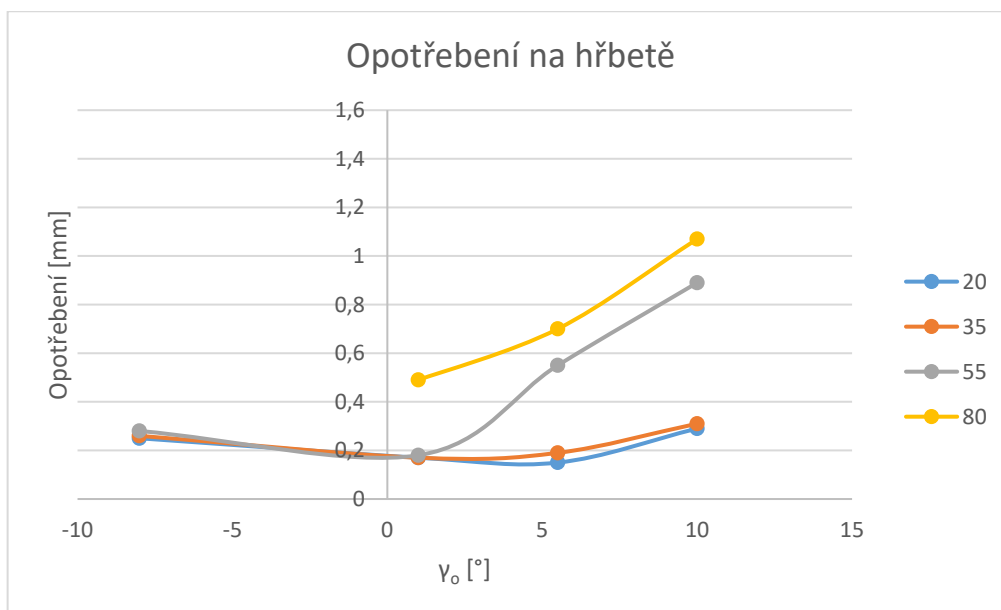


Graf 32 - Závislost opotřebení nástroje na čele na řezné rychlosti pro jednotlivé geometrie

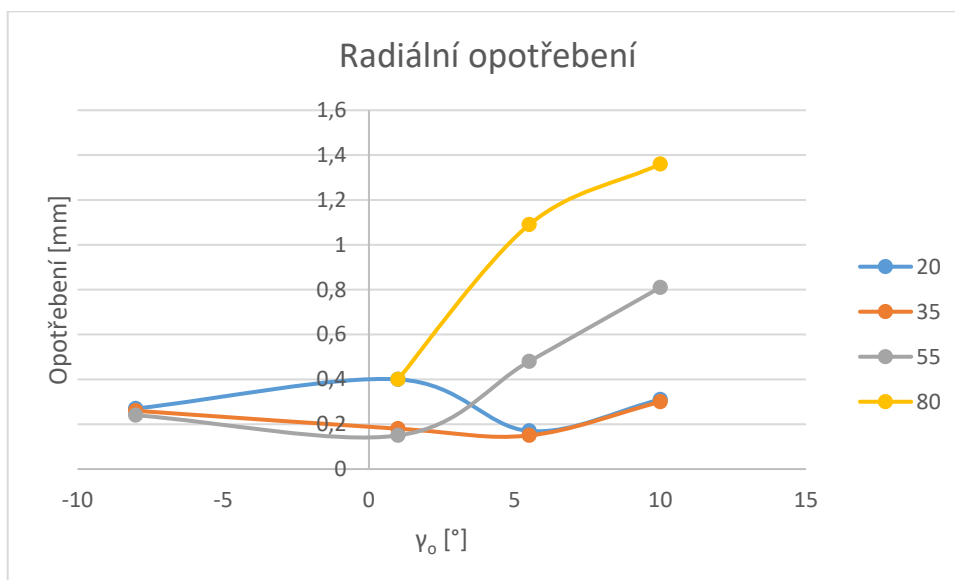
V grafu 32 je znázorněno radiální opotřebení nástrojů v závislosti na řezné rychlosti. Příslušné naměřené hodnoty jsou pak zaznamenány v tabulce 23. Způsob měření opotřebení na digitálním mikroskopu je znázorněno na obrázku 47. Z naměřených hodnot je patrné, že pro úhly čela -8° a 1° se opotřebení nemění asi do rychlosti 55 m/min. Následuje nárůst opotřebení, což je pravděpodobně dáno velkými teplotami při větších řezných rychlostech. U úhlech čela $5,5^\circ$ a 10° tento nárůst nastává již při rychlostech 35 m/min a má větší gradient. To je s největší pravděpodobností způsobeno menším množstvím materiálu v břitu při takto ostrých geometriích. Dále je z grafu zřejmá jedna anomálie. Tou je pokles opotřebení u nástroje s úhlem čela 1° při menších řezných rychlostech. To může mít několik důvodů. Jedním z nich mohou být lepší podmínky pro tuto geometrii. Další důvody jsou spojovány s chybou či odchylkou při měření. Tento jev by si zasloužil dalšího zkoumání, kvůli ověření správnosti tvrzení.

11.3.4. Porovnání opotřebení nástrojů při pro jednotlivé řezné rychlosti v_c

Na grafech 33 a 34, které jsou uvedeny dále, je znázorněno opotřebení nástrojů v závislosti na úhlu čela γ_0 pro jednotlivé řezné rychlosti. U obou druhů opotřebení je mechanismus takřka totožný. Při řezných rychlostech 20 a 35 m/min se opotřebení nástroje výrazně nemění. Je patrný malý pokles opotřebení při úhlech čela 1° a $5,5^\circ$. Při vyšších řezných rychlostech je pak zřejmý značný nárůst opotřebení při pozitivnějších geometriích. Při řezných rychlostech 55 a 80 m/min lze pak říci, že pro úhly čela $5,5^\circ$ a 10° se nejedná o opotřebení, ale o destrukci destiček. Jak už bylo zmíněno, tento jev je dán menším množstvím materiálu v ostří nástroje, což logicky vyplývá z ostré geometrie destičky.



Graf 33 – Opotřebení na hřbetě v závislosti na úhlu čela γ_0 pro jednotlivé řezné rychlosti



Graf 34 – Radiální opotřebení v závislosti na úhlu čela γ_0 pro jednotlivé řezné rychlosti

11.3.5. Závěrečné hodnocení opotřebení nástrojů

Z naměřených hodnot opotřebení nástrojů je patrné, že opotřebení při obrábění slitiny niklu Inconel 713 LC roste rapidně se zvětšující se rychlostí a se zvětšováním úhlu čela.

Nejlepší se zdá být úhel čela 1°. Při této geometrii je opotřebení relativně malé i při vyšších rychlostech.

Dále bylo zjištěno, že podobně jako u předešlých závěrů i zde je nejvhodnější rychlost 35 m/min. Při této rychlosti jsou hodnoty opotřebení pro všechny použité řezné rychlosti skoro shodné.

11.4. Měření mikrotvrdosti do hloubky od obrobeného povrchu

Měření tloušťky zpevněné vrstvy po obrábění je důležité kvůli určení minimální odřezávané vrstvy. Je výhodné, aby tloušťka odřezávané vrstvy odřezávala celou zpevněnou oblast, neboť tvrdost zpevněné vrstvy může být značně vyšší než obvyklá tvrdost materiálu.

11.4.1. Příprava vzorků

Pro měření mikrotvrdosti a další experimenty bylo potřeba zhotovit metalografické výbrusy. Existuje několik metod, jak tyto výbrusy zhotovit. Po neúspěšném pokusu lisování vzorků za tepla bylo rozhodnuto, že „puky“ budou zalévány za studena.

Vzhledem k tomu, že pro každou geometrii byly zvoleny krajní hodnoty (nejmenší rychlost s nejmenším posuvem a největší rychlost s největším posuvem) při konstantní hloubce řezu $a_p = 0,5$ mm, bylo vyrobeno 8 vzorků. Další dva vzorky byly odříznuty z broušeného povrchu pro porovnání s naměřenými hodnotami. Celkem bylo tedy připraveno 10 vzorků.

Postup zhotovení vzorků byl následující:

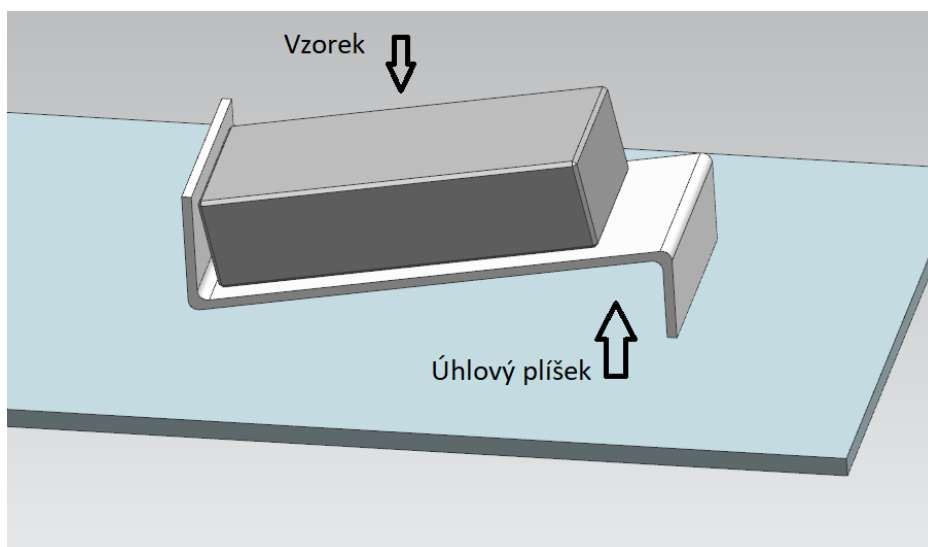
- 1) Řezání kvádrů na rozměry 5x8x20mm na metalografické rozbrušovací pile.
- 2) Upnutí do svěráku CNC obráběcího stroje (použitý stejný stroj i nástroj jako u měření sil).
- 3) Zaměření obrobku.
- 4) Napsání programu pro příslušné řezné podmínky (zvoleny krajní hodnoty).
- 5) Obrobení vzorků.
- 6) Sražení hran.
- 7) Umístění vzorků do připravených forem (uložení na úhlové plíšky – viz obr. 49).
- 8) Navážení směsi CLAROCIT (průhledný) v poměru (prášek) 5:3 (tekutina).
- 9) Za stálého míchání nasypání prášku do tekutiny.
- 10) Míchání směs 90 vteřin.
- 11) Zalítí vzorku ve formách.
- 12) Vytvrzení 24 hodin.
- 13) Popsání vzorků.
- 14) Broušení.

Broušení bylo prováděno na metalografické pile s následujícím postupem:

- 1) Umístění sudého počtu zalitých vzorků do přípravku obráceně (zkoumanou stranou vzhůru). Upínání za průměr.
- 2) Nastavení přítlačné síly 20 N na jeden vzorek.
- 3) Na brusném papíru SiC 80 odebrat 700 μm kvůli zarovnání druhé strany vzorků.
- 4) Obrácení vzorků, upnutí a zhotovení metalografických výbrusy dle tabulky 24.

Tab. 24 – Postup zhotovení metalografických výbrusů

Operace	Druh kotouče	Síla na jeden vzorek	Výška úběru/čas
1	Papír SiC 80	20 N	500 μm
2	Papír SiC 120	20 N	300 μm
3	Papír SiC 320	20 N	300 μm
4	Čištění kartáčkem pod tekoucí vodou		
5	ALLEGRO + diamant 9 μm	20 N	3 minuty
6	Čištění kartáčkem pod tekoucí vodou		
7	DAC + diamant 3 μm	20 N	5 minut
8	Vyčistit lihem (ochrana proti korozi)		

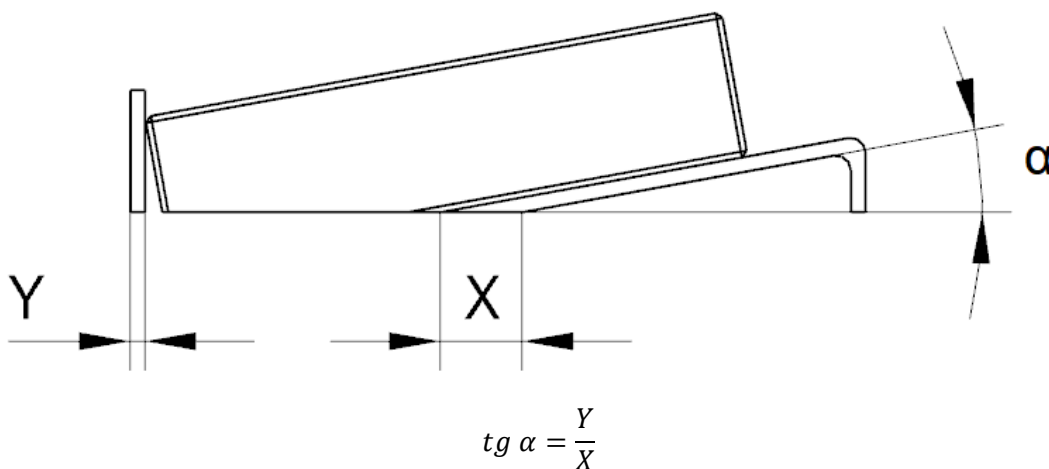

Obr. 48 – Nařezané vzorky na metalografické výbrusy v porovnání s břitovou destičkou

Obr. 49 – Umístění vzorků na úhlové plíšky



Obr. 50 – Hotový metalografický výbrus v hmotě CLAROCIT

Jak bylo již zmíněno, vzorky byli umístěny na úhlové plíšky. Měřením bylo zjištěno, že každý plíšek byl vyroben jinak a tím pádem každý vzorek má unikátní úhel naklonění. Z tohoto zjištění plyne, že je nutné určit pro každý vzorek převodový poměr, který bude udávat hloubku v závislosti na vzdálenosti od hrany. Tento poměr byl určen z poměru tloušťky plíšku a délky šikmé strany ve výbrusu. Schéma měření a určení poměru je na obrázku 51.

Dle rovnice uvedené v obr. 51 je pak možné vypočítat převodní poměr. Pokud je X vydělena Y , dostáváme hodnotu, jenž svou velikostí odpovídá délce na výbrusu, která je nutná k dosažení hloubky 1 mm.



Obr. 51 – Schéma určení převodového poměru pro výpočet hloubky v závislosti na vzdálenosti od hrany vzorku

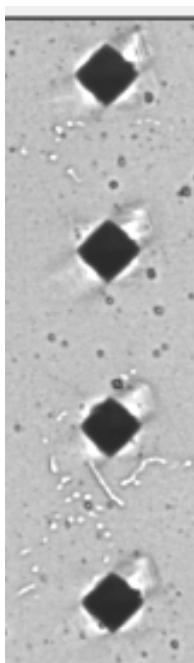
11.4.2. Postup měření mikrotvrlosti

Po zhotovení metalografických výbrusů je již možné měřit mikrotvrdot. Měření dle Vickerse bylo prováděno dle normy ČSN EN ISO 6507-1. K měření byl použit Digitální mikroskop s diamantovým vnikacím tělesem ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu o čtvercové základně. Dle normy bylo použito zatížení 300 gf (2,942N) při době zatěžování 12 vteřin. Výsledné značení je tudíž: X HV 0,3/12, kde X je hodnota tvrdosti dle Vickerse.

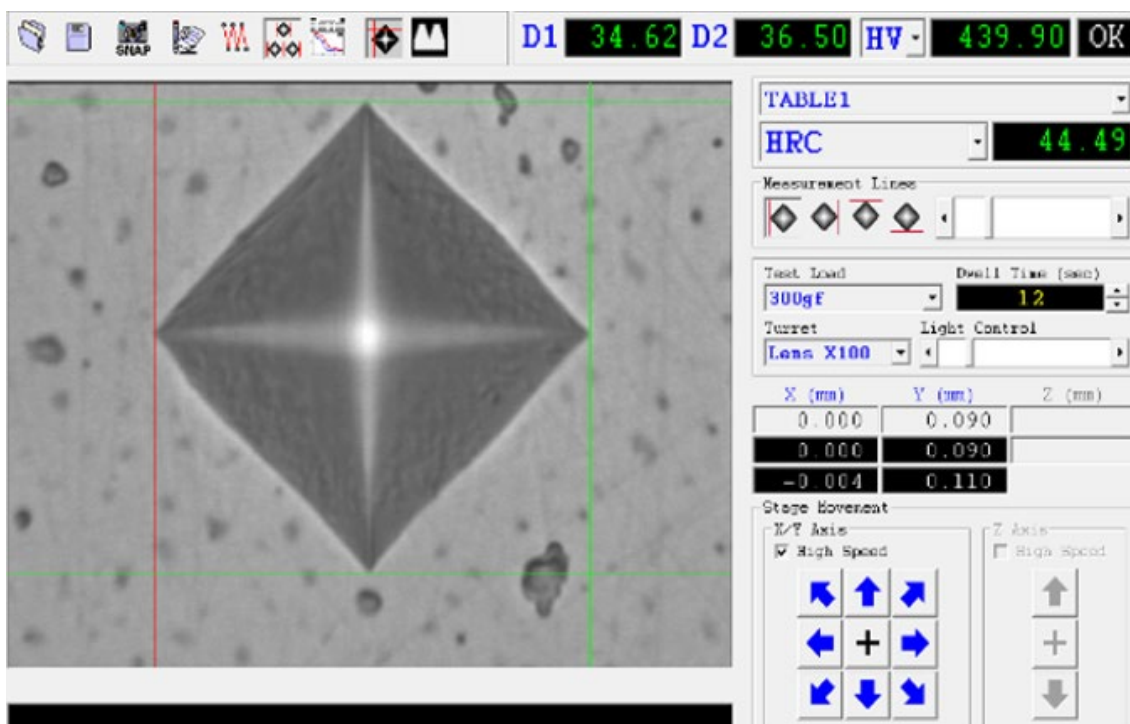
Vzhledem k tomu, že mikroskop je připojen k počítači vybaveným příslušným software k ovládání mikroskopu, nebyl problém zadat požadované souřadnice pro jednotlivé vpichy. Matice, která byla zvolena, obsahovala 7 sloupců a 25 řad. Každá řada tedy měřila 7 hodnot v jedné hloubce. Z těchto sedmi hodnot byla největší a nejmenší hodnota vyškrtuta a ze zbývajících pěti hodnot byl vypočítán aritmetický průměr.

Norma určuje, že vpichy musí být 2,5 x délka úhlopříčky od kraje a 3 x délka úhlopříčky od sebe. Pro určení rozměrů matice a rozestupu vpichů byl vykonán jeden náhodný vpich. U tohoto testovacího vpichu byly změřeny úhlopříčky a z těchto hodnot pak byly stanoveny rozestupy a vzdálenost prvního vpichu od kraje.

Po vykonání všech vpichů obsažených v matici pak byly automaticky změřeny délky úhlopříček a z nich následně spočítána tvrdost materiálu. Vzhledem k občasné nedokonalosti SW musela být jednotlivá měření vpichů zkontrolována kvůli případným chybám.

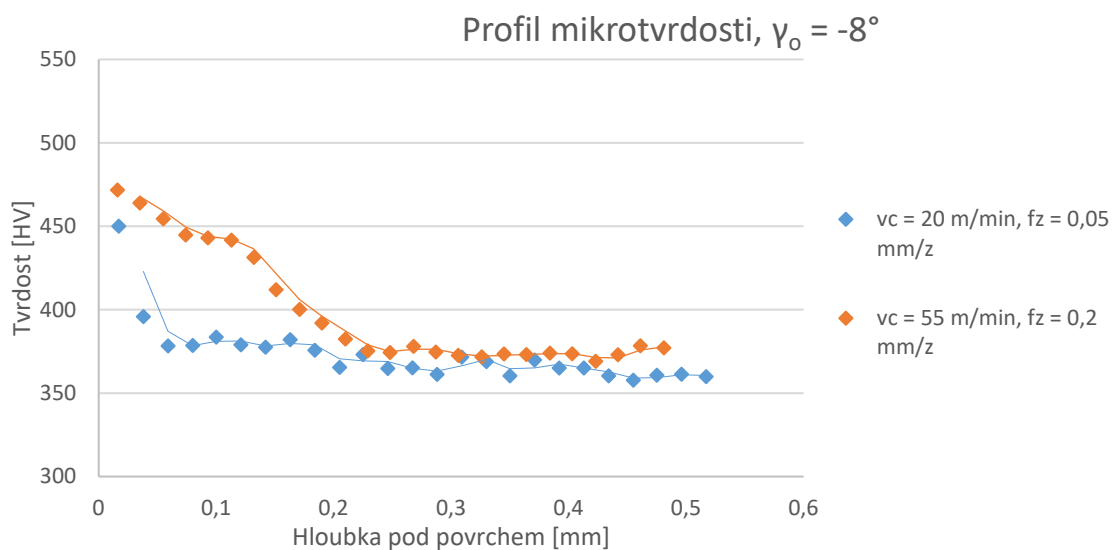


Obr. 52 – Část sloupce matice vpichů (zvětšení 10x)



Obr. 53 – Odečítání délek uhlopříček u vpichu pomocí SW (zvětšení 100x)

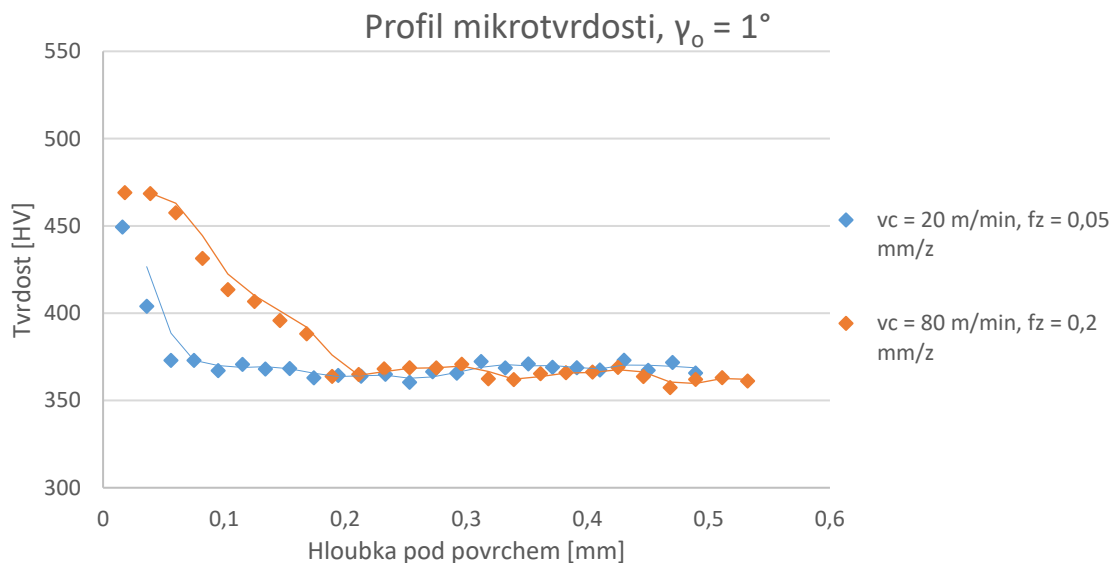
11.4.3. Naměřené hodnoty mikrotvrdosti



Graf 35 – Tvrdość materiálu v závislosti na hloubce při obrábění nástrojem s úhlem čela $\gamma_o = -8^\circ$

Průběh tvrdosti v závislosti na hloubce pro obrábění nástrojem s úhlem čela -8° , který je zobrazen v grafu 35, ukazuje že při malých řezných rychlostech je zpevněná vrstva pouze do hloubky asi 0,05 mm. Při řezných podmínkách, kdy jsou řezná rychlost a posuv velké, zpevněná vrstva dosahuje do hloubky téměř 0,2 mm.

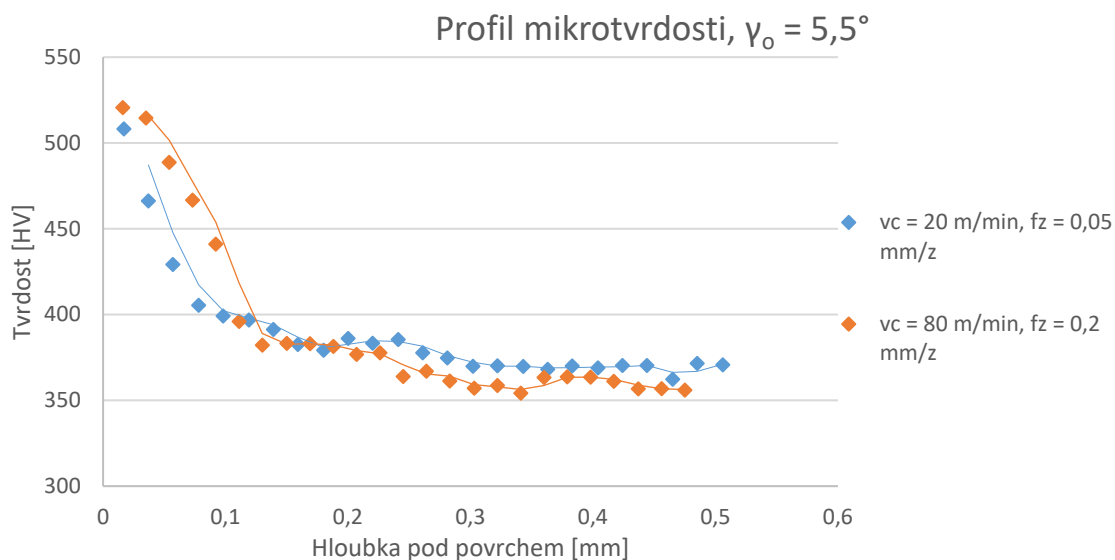
Hodnota tvrdosti ve zpevněné vrstvě činí přes 450 HV, což je znatelný rozdíl oproti běžné tvrdosti, která se pohybuje kolem 370 HV.



Graf 36 – Tvrlost materiálu v závislosti na hloubce při obrábění nástrojem s úhlem čela $\gamma_o = 1^\circ$

Průběh tvrdosti v závislosti na hloubce pro obrábění nástrojem s úhlem čela 1° , který je zobrazen v grafu 36, ukazuje, že při malých řezných rychlostech a malých posuvech je zpevněná vrstva pouze do hloubky asi 0,05 mm podobně jako u předešlého případu. Při řezných podmínkách, kdy jsou řezná rychlost a posuv velké, zpevněná vrstva dosahuje do hloubky téměř 0,2 mm.

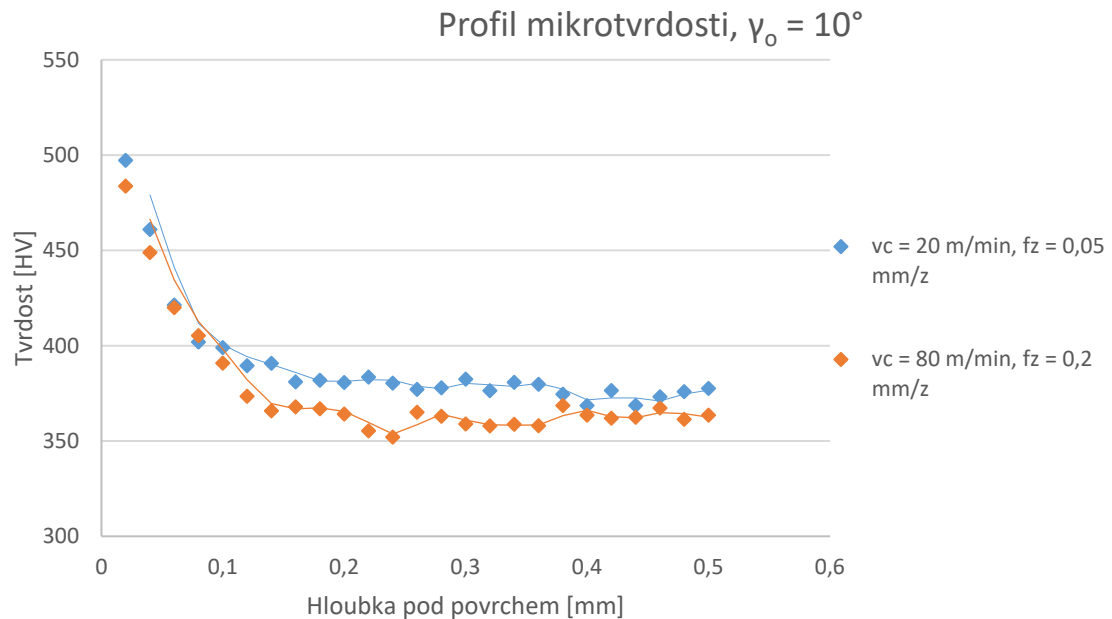
I zde hodnota tvrdosti ve zpevněné vrstvě činí přes 450 HV, což je znatelný rozdíl oproti běžné tvrdosti, která se pohybuje kolem 370 HV.



Graf 37 – Tvrlost materiálu v závislosti na hloubce při obrábění nástrojem s úhlem čela $\gamma_o = 5,5^\circ$

Průběh tvrdosti v závislosti na hloubce pro obrábění nástrojem s úhlem čela $5,5^\circ$, který je zobrazen v grafu 37, ukazuje že při malých řezných rychlostech je zpevněná vrstva pouze do hloubky asi 0,05 mm. Od této hodnoty tvrdost klesá pomaleji až do hodnoty 0,18, kde se začíná ustalovat. Při řezných podmínkách, kdy jsou řezná rychlost a posuv velké, zpevněná vrstva dosahuje do hloubky téměř 0,14 mm.

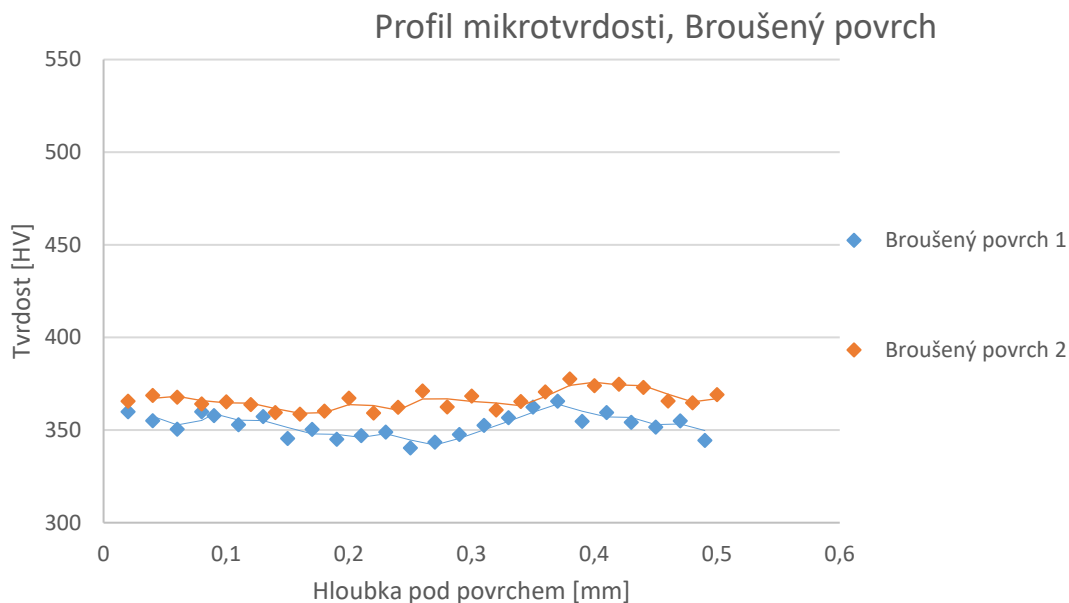
Hodnota tvrdosti ve zpevněné vrstvě se pohybuje kolem 500 HV, což je velký rozdíl oproti běžné tvrdosti, která se pohybuje kolem 370 HV.



Graf 38 – Tvrdost materiálu v závislosti na hloubce při obrábění nástrojem s úhlem čela $\gamma_o = 10^\circ$

Průběh tvrdosti v závislosti na hloubce pro obrábění nástrojem s úhlem čela 10° , který je zobrazen v grafu 38, ukazuje že při této geometrii nástroje nezáleží moc na řezných rychlostech a průběhy jsou skoro stejné. Zpevněná vrstva zasahuje až do hloubky 0,12 mm.

Jako v předešlém případě se hodnota tvrdosti ve zpevněné vrstvě se pohybuje kolem 500 HV, což je značné velký rozdíl oproti běžné tvrdosti, která se pohybuje kolem 370 HV.



Graf 39 – Tvrdost materiálu v závislosti na hloubce u broušených povrchů

Jak lze vidět na grafu 39, tak u zpevněných povrchů není žádná zpevněná vrstva. Tento fakt se shoduje s teoretickými předpoklady. Při broušení totiž jsou používány pouze velmi malé síly a malé úběry materiálu. Z tohoto důvodu nedochází ke zpevnění povrchu vlivem deformace.

11.4.4. Závěrečné hodnocení mikrotvrdostí

Z naměřených hodnot, které jsou uvedeny výše, vyplývá, že pro velmi ostré nástroje s velkým uhlem čela přestává záležet na řezných podmínkách pro tloušťku zpevněné vrstvy, která má hodnoty od 0,1 mm do 0,2 mm.

Při menších úhlech čela pak záleží na řezných podmínkách. Při malých řezných rychlostech a malých posuvech je tloušťka zpevněné vrstvy asi 0,05 mm. Naopak při obrábění velkou řeznou rychlostí při větších posuvech je její tloušťka až 0,2 mm.

U broušených ploch nenastává zpevnění, neboť se jedná o obrábění s malými silami a při malých úběrech. Z těchto důvodů tam nedochází k plastické deformaci a tím pádem ani ke zpevnění materiálu.

Rozdíl mezi zpevněnou vrstvou a nezpevněnou je od 130 do 80 HV, což je značné. Při obrábění by to pak mohlo způsobovat značné problémy. Z tohoto důvodu je potřeba znát tloušťku zpevněné vrstvy, aby se mohla stanovit hodnota nejmenší odřezávané vrstvy, která by měla být vždy větší než tloušťka zpevněné vrstvy.

11.5. Optická metalografie

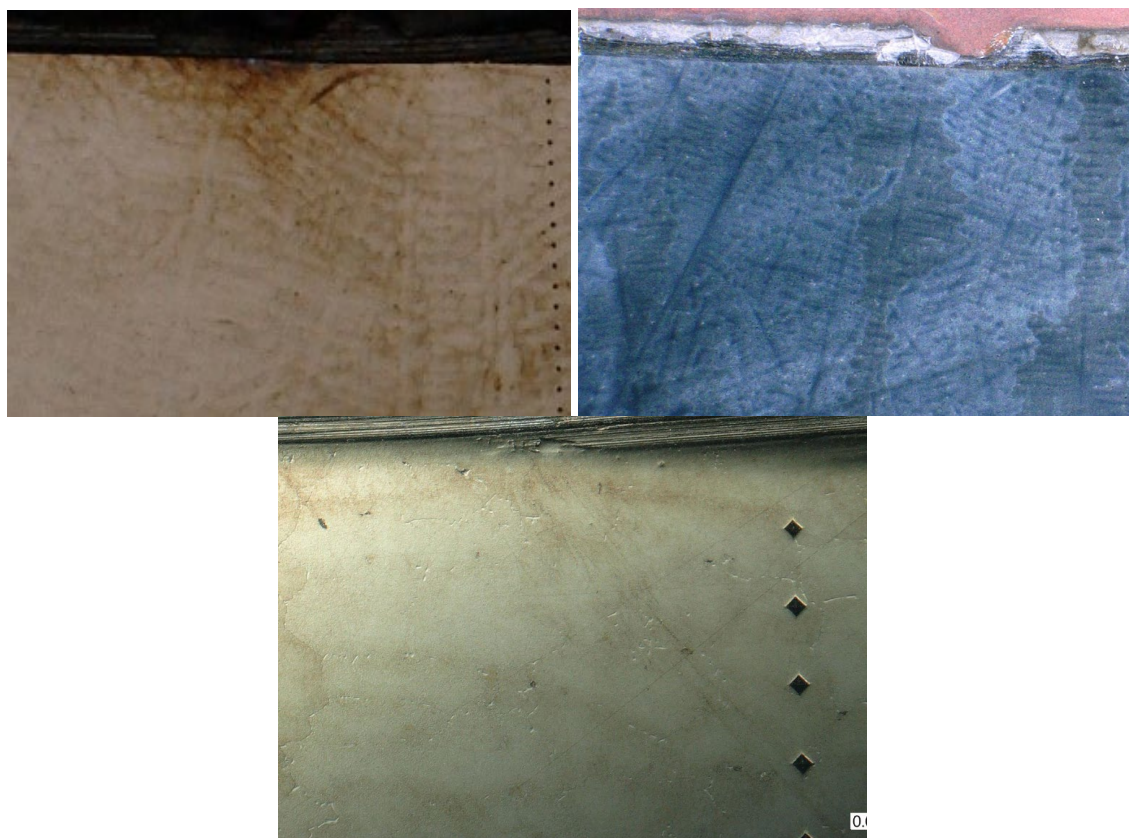
Optická metalografie slouží k analýze mechanismů deformačního zpevňování vzorků. Vzhledem k tomu, že metalografické výbrusy jsou již připraveny z předchozího měření, je snadné provádět optickou metalografii, která spočívá v leptání těchto výbrusů.

11.5.1. Postup leptání

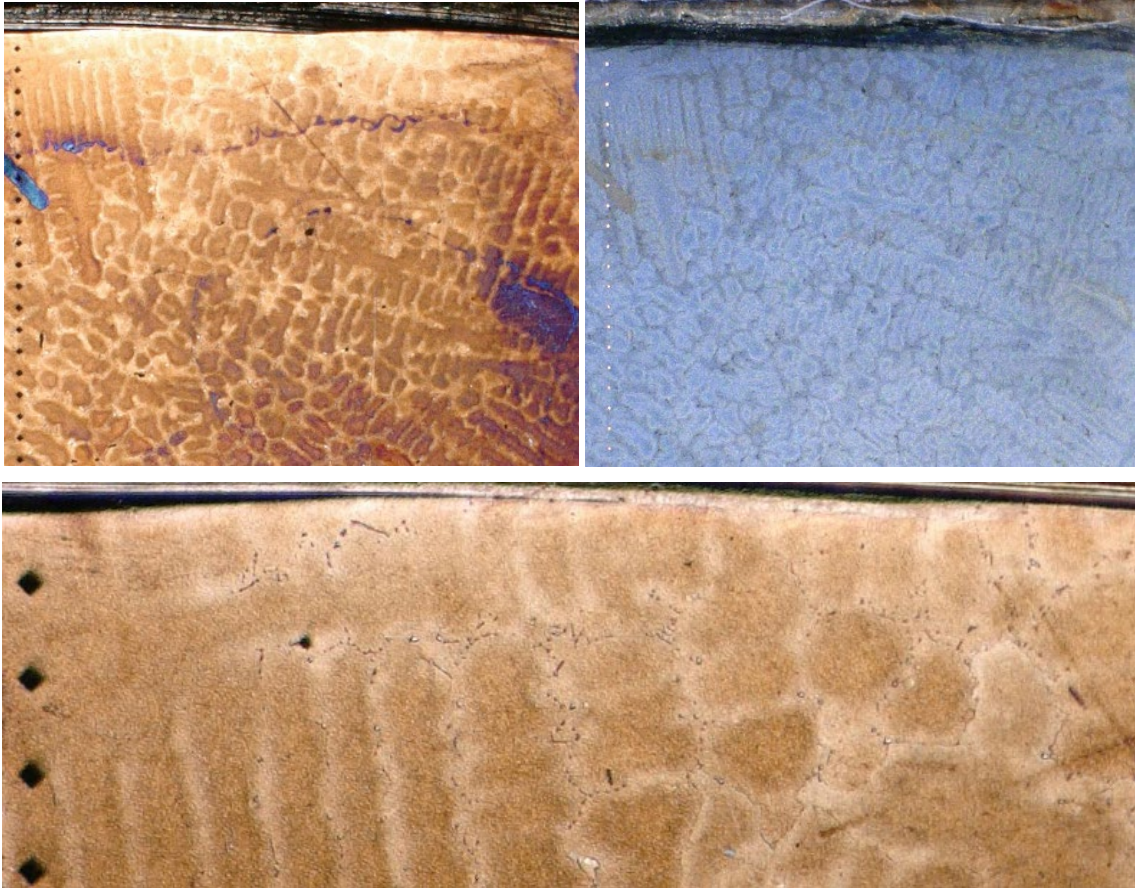
Leptání bylo provedeno na vzorcích 1, 3, 7, 11, 12 a B2. Vzhledem k tomu, že vzorky byly již hotové na měření mikrotvrdosti, tak to značně usnadnilo přípravu. Tyto vzorky byly vyprány v ultrazvukové pračce kvůli odstranění veškerých nečistot ze vzorků. Následovalo opakované leštění vzorků na leštícím papíru DAC s přidáním diamantem o velikosti 3 μm . Po leštění byly vzorky vyčištěny lihem.

Následovalo samotné leptání vzorků, které bylo prováděno pomocí leptadla MARBLE (CuSO_4 – 10 g, HCl – 50 ml, demineralizovaná voda – 50 ml) s přidavkem peroxidu (H_2O_2 – 5 ml). Tato směs se namíchala do misky a následně se nechala působit na vzorek po dobu 5 vteřin. Poté byl vzorek okamžitě opláchnut vodou, aby se zastavilo leptání. Vzorky byly na závěr vyčištěné lihem.

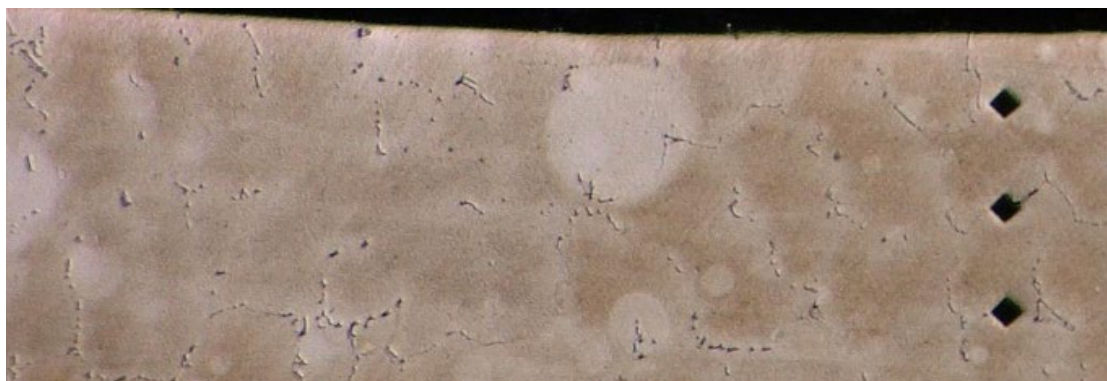
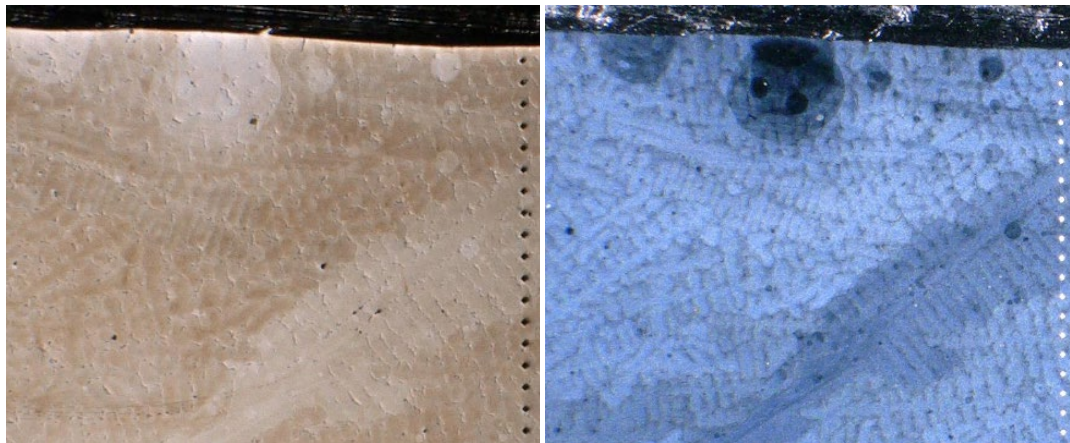
11.5.2. Snímky optické metalografie



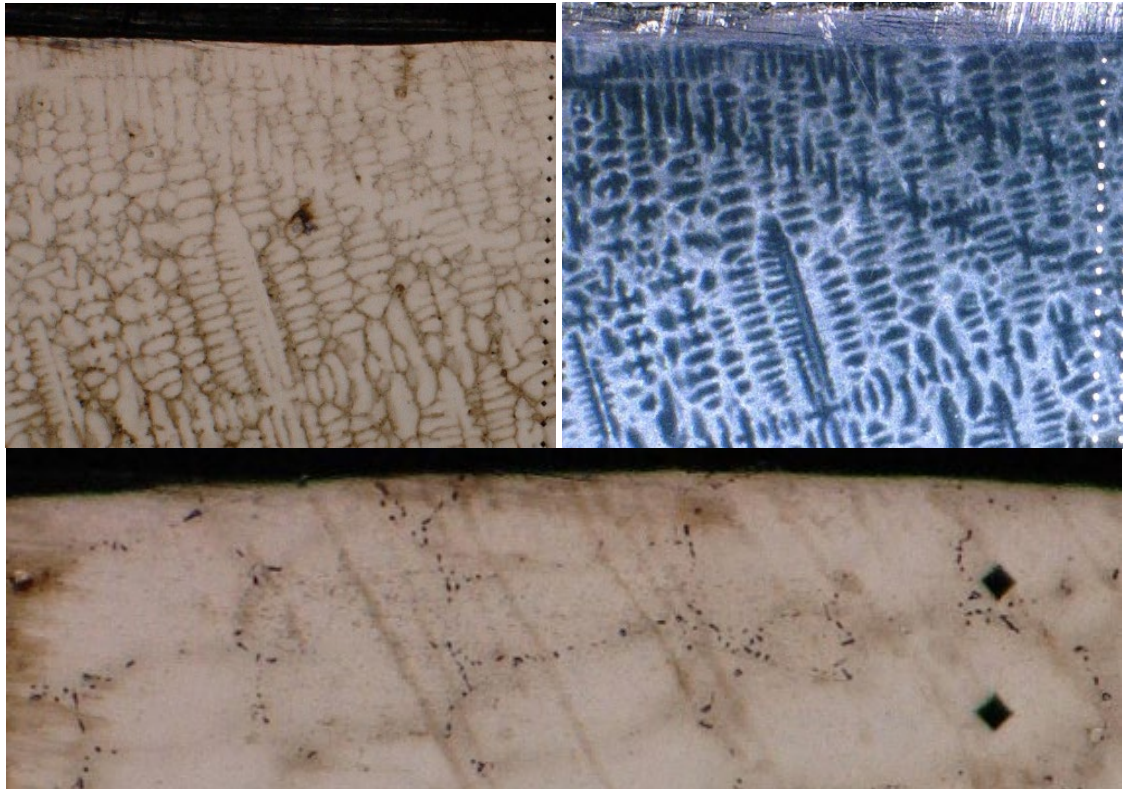
Obr. 54 – Snímky struktury vzorku č. 1, a) – zvětšení 30x, b) – zvětšení 50x, c) – zvětšení 300x



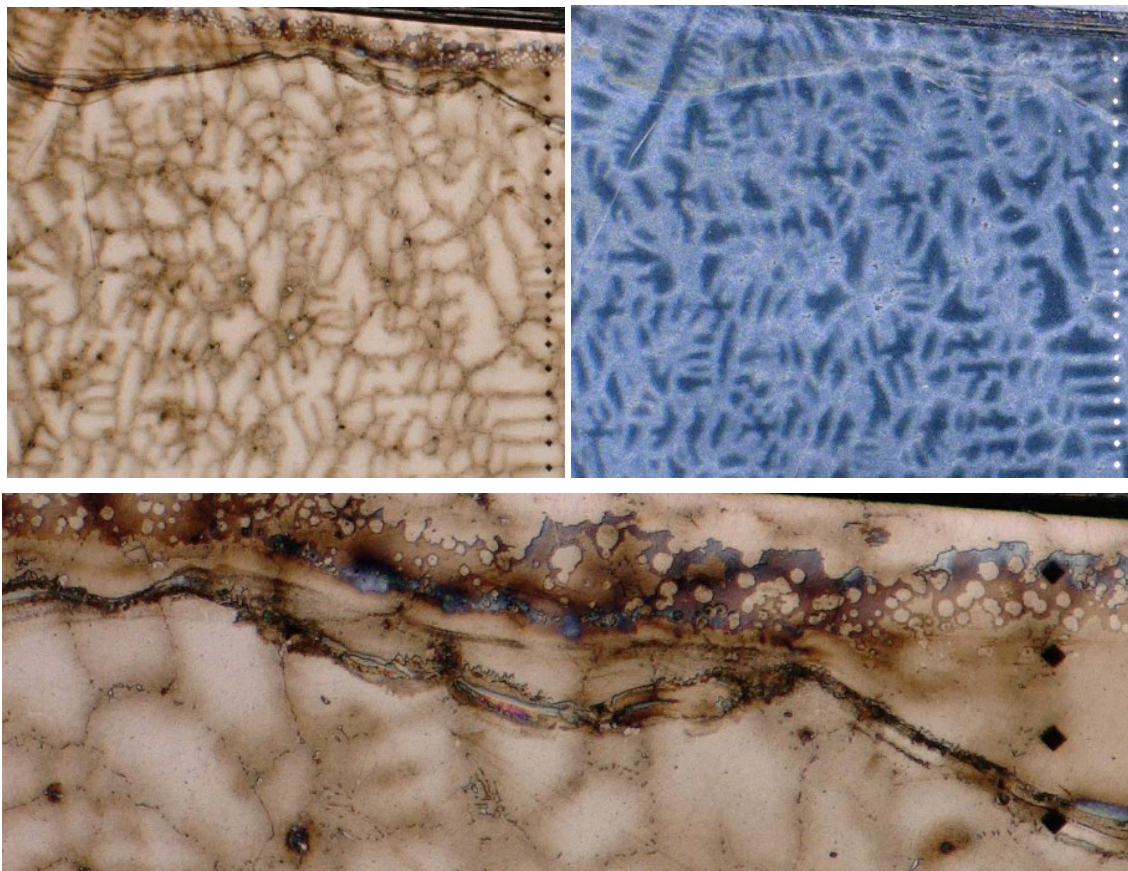
Obr. 55 – Snímky struktury vzorku č. 3, a) – zvětšení 50x, b) – zvětšení 50x, c) – zvětšení 200x



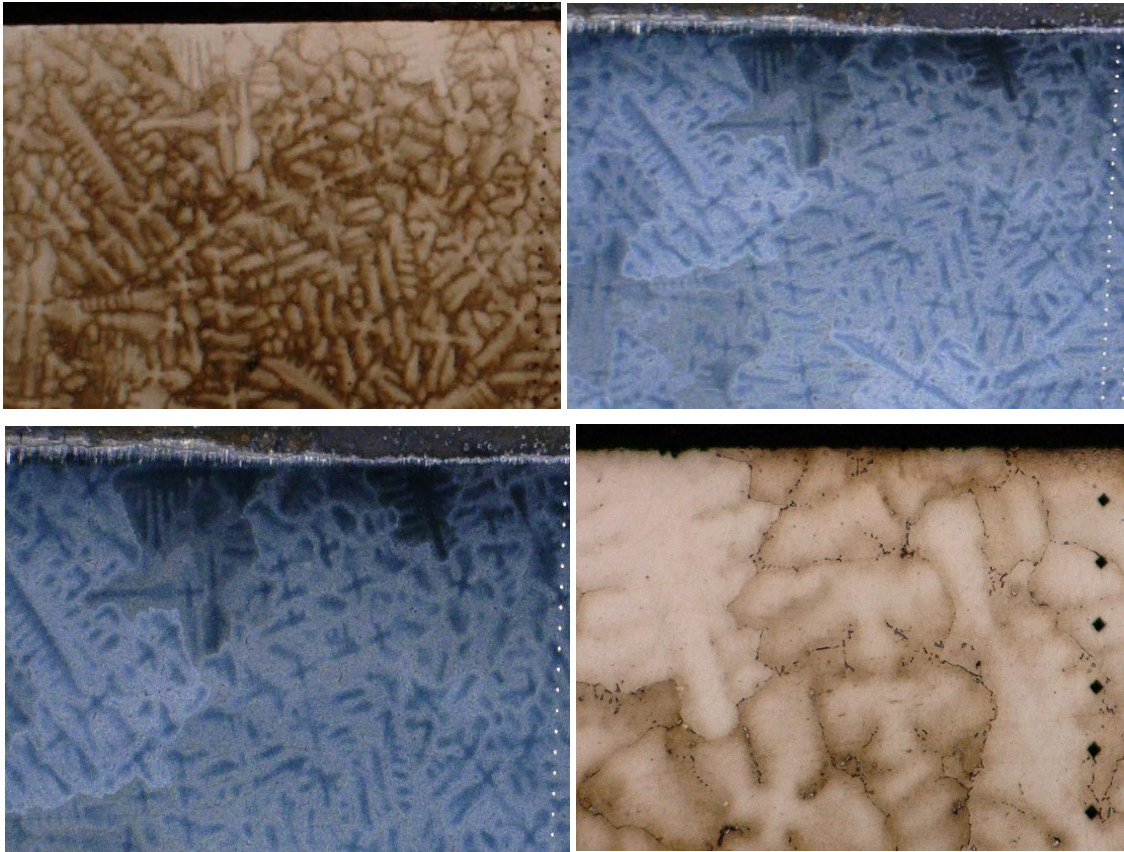
Obr. 56 – Snímky struktury vzorku č. 7, a) – zvětšení 50x, b) – zvětšení 50x, c) – zvětšení 200x



Obr. 57 – Snímky struktury vzorku č. 11, a) – zvětšení 50x, b) – zvětšení 50x, c) – zvětšení 200x



Obr. 57 – Snímky struktury vzorku č. 12, a) – zvětšení 50x, b) – zvětšení 50x, c) – zvětšení 200x



Obr. 58 – Snímky struktury vzorku č. B2, a) – zvětšení 30x, b) – zvětšení 30x, c) – zvětšení 50x, d) – zvětšení 200x

11.5.3. Závěrečné hodnocení optické metalografie

Na snímcích z 54 až 58 je viditelná dendritická struktura slitiny Inconel 713 LC. Snímky žluté barvy jsou osvětleny koaxiálním světlem a snímky modrých barev jsou světleny světlem vně objektivu. Na snímcích osvětleny zvnějšku jsou patrná vedle dendritických „stromků“ také zrna.

Předpoklad byl, že zpevnění materiálu bude mít za příčinu natočení a deformace dendritických objektů podobně, jako je tomu třeba u nerezových ocelí, kde se natáčí a mění zrna. Tento jev se ovšem neprokázal na žádném vzorku a zpevnění tudíž musí způsobovat jiný princip. Zpevnění se neprojevilo na struktuře. Je pouze možné, že dendritické objekty, popřípadě precipitační karbidy byly stlačeny vlivem velké pasivní síly, která byla při obrábění zjištěna velká. Změna struktury však nebyla zkoumána podrobně a bylo by zapotřebí hlubšího zkoumání této problematiky, aby se mohlo dojít k jednoznačným výsledkům.

11.6. Zbytková napětí

Měření zbytkových napětí se provádí pro zjištění, jaký druh a jaká velikost se po obrábění v materiálu vyskytuje. Obecně se uvažuje, že tlaková jsou výhodná, kdežto tahová nevýhodná, protože podporují vznik a rozšíření povrchových trhlin.

11.6.1. Příprava vzorků

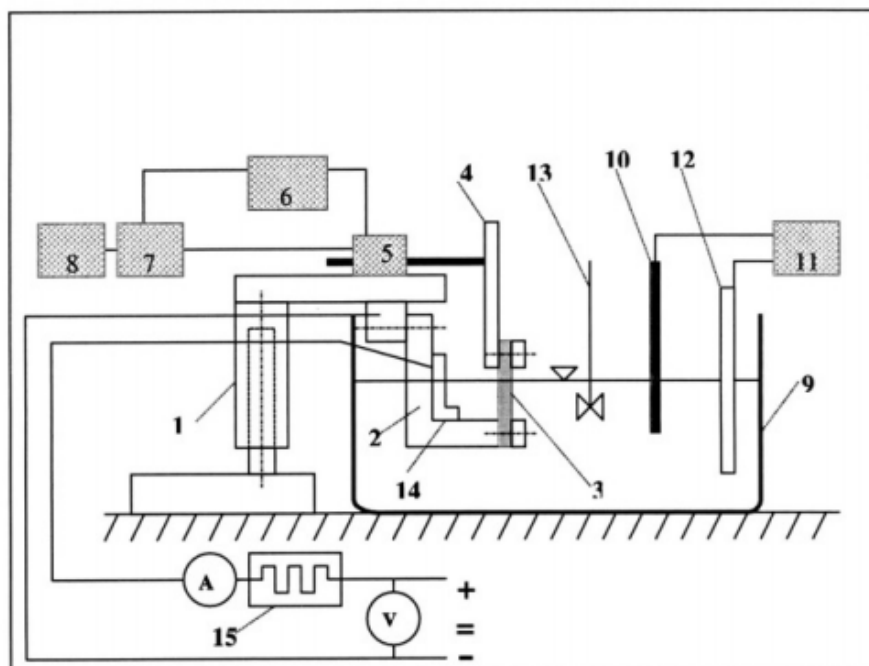
Destička ze slitiny Inconel 713LC byla rozřezána na metalografické rozbrušovací pile na 5 plátků o rozměrech 5 x 8 x 38 mm. Jeden plátek byl nechán tak jak je, neboť jeho povrch je broušený a pro referenční hodnoty byl tak vzorek již připraven. Zbývající 4 plátky byly upnuty do CNC frézky a následně obráběny s hloubkou třísky 0,5 mm. Řezné podmínky a geometrie nástrojů byly v krajních hodnotách. Jednotlivé podmínky jsou uvedeny v tabulce 25.

Tab. 25 – Řezné podmínky obrábění vzorků pro měření zbytkových napětí

Destička ČVUT, $\gamma_0 = -8^\circ$			Destička RPHX, $\gamma_0 = 10^\circ$		
Vzorek	Vc [m/min]	fz [mm/z]	Vzorek	Vc [m/min]	fz [mm/z]
1	20	0,05	12	20	0,05
3	55	0,2	15	80	0,2

11.6.2. Zařízení pro měření zbytkových napětí

Měření zbytkového napětí bylo provedeno pomocí metody elektrolytického odleptávání povrchových vrstev. Schéma zařízení je znázorněno na obrázku 59 a samotné zařízení v laboratořích FS ČVUT je pak na obrázku 60.



Obr. 59 – Schéma zařízení pro elektrolytické odleptávání vrstev a měření deformací [46]

1 – stojan, 2 – upínač tělesa, 3 – zkoumané těleso, 4 – měřicí praporek, 5 – indukční snímač, 6 – napájení, 7 – obvod nastavení polohy snímače, 8 – registrační zařízení, 9 – nádoba s elektrolytem, 10 – teploměr, 11 – spínač topného tělesa, 12 – topné těleso, 13 – míchání elektrolytu, 14 – pracovní elektroda, 15 – měnič.



Obr. 60 – Zařízení pro odleptávání vrstev v laboratořích FS ČVUT

11.6.3. Postup měření

- 1) Zvážení obrobeneho ještě neodleptaného vzorku.
- 2) Změření tloušťky a šířky vzorku.
- 3) Zaizolování vzorku pomocí lepicí pásky (mimo leptanou plochu a konců vzorku pro vodivé uchycení).
- 4) Připevnění měřícího praporku na vzorek.
- 5) Zavoskování vrchní části vzorku (včetně připojovací části praporku), která bude zasažena elektrolytem.
- 6) Upnutí vzorku s praporkem na přípravku na stojanu.
- 7) Změření vzdálenosti středu leptané plochy od středu snímače.
- 8) Nastavení čidla doprostřed měřícího rozsahu (vzdálenost od praporku cca 1,5 až 2 mm).
- 9) Zavoskování spodní části vzorku a přípravku ponořením do vosku
- 10) Ponoření vzorku do nádoby s elektrolytem
- 11) Zapnutí záznamu deformace na PC
- 12) Odstátí vzorku pro vyrovnání teplot (5 až 10 minut).
- 13) Zapnutí elektrického obvodu.
- 14) Zaznamenávání závislosti deformace na čase v počítači.
- 15) Vypnutí elektrického obvodu po skončení měření (cca 20 až 30 minut po zapnutí obvodu).

- 16) Vysunutí stojanu z lázně a očištění vodou.
- 17) Vyjmutí vzorku ze stojanu a sejmutí praporku.
- 18) Odstranění lepící pásky a očištění od vosku pomocí technického benzínu.
- 19) Zvážení vzorku po odleptání.
- 20) Změření výšky leptané plochy.
- 21) Zpracování naměřených hodnot.

Měřený vzorek je nejprve celý zaizolován ochrannou páskou, a to velmi důkladně, mimo námi vybrané leptané plochy z důvodu zamezení narušení materiálu právě mimo tuto plochu vlivem elektrolytu. V případě upínacích přípravků je páska nedostačující a je nutno použít jiný materiál. V laboratořích FS ČVUT se k tomuto účelu používá vosk, který je výhodný zejména svými příznivými vlastnostmi, jako je izolování elektrického proudu, pružnost a jiné a slouží především jako mechanická bariéra před působením elektrolytu.

Umístění vzorku je patrné ze schématu zařízení (obr. 59). Měřený vzorek je pevně a vodivě spojen s pracovní elektrodou a na druhé straně vzorku je připevněný měřící praporek, který musí mít co nejmenší hmotnost, aby svou tíhou neovlivňoval měřený vzorek. Měřící snímač, který je umístěn na hlavním stojanu je ustaven kolmo k měřicímu praporku snímá deformaci vzorku pomocí pohybu praporku.

Pro správné použití této metody je důležité správné nastavení vzdálenosti elektrod, na kterém nelineárně závisí intenzita úběru. Dále se nastavuje proudová hustota, kde je při správné hodnotě proudové hustoty úběr téměř konstantní. Celý proces leptání byl řízen pomocí proudové stabilizace, při kterém je leptání indikováno kolísáním napětí.

11.6.4. Naměřené hodnoty

Záznam v počítači byl vyhodnocován jako změna vzdálenosti praporku od čidla. Naměřené hodnoty tudíž ukazovaly jen změnu deformace vzorku při odleptávání. Přepočet na zbytková napětí byl proveden pomocí jednoduchého početního SW. Vzhledem k tomu, že experimentálně ověřená podmínka tvrdí, že dochází ke konstantnímu úběru materiálu, můžeme přiřadit hodnotu odleptané tloušťky materiálu k příslušnému času záznamu.

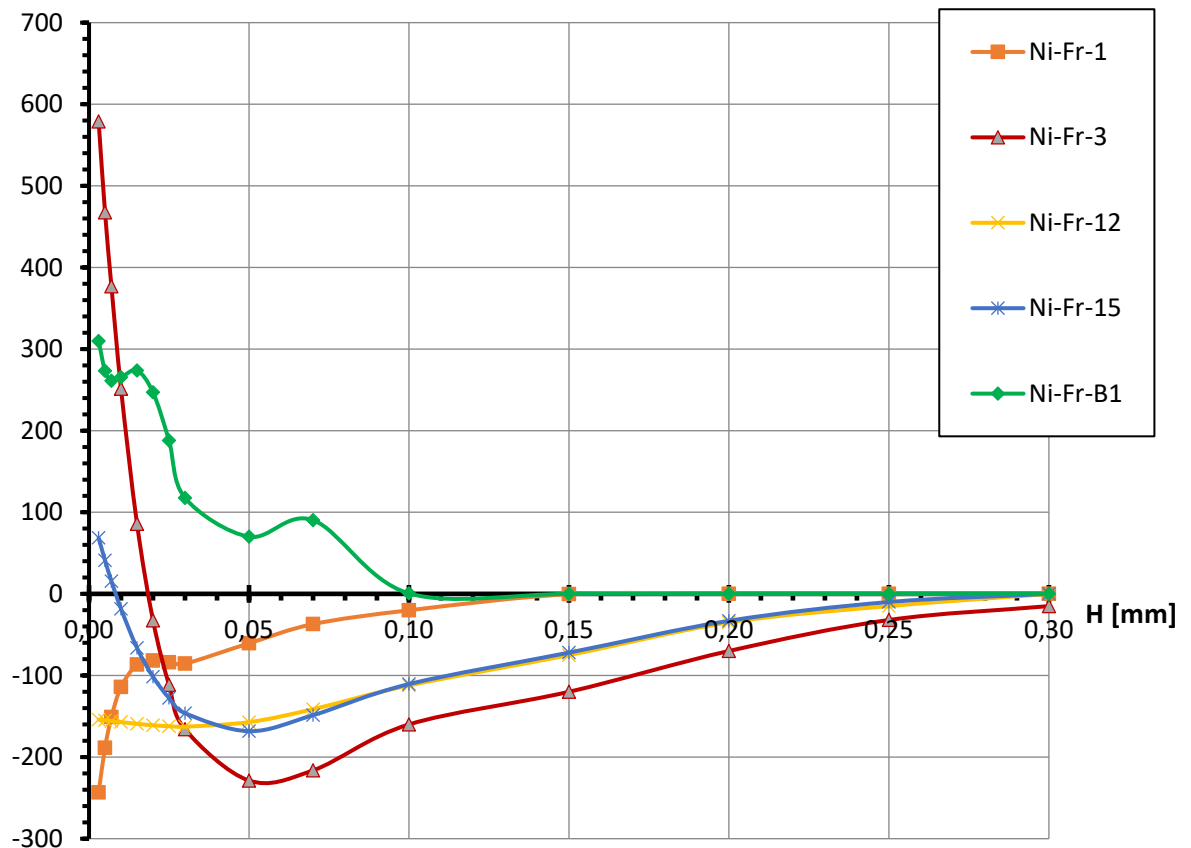
Hodnoty přepočtených zbytkových napětí jsou uvedeny v tabulce 25. Hodnoty ve větších hloubkách byly získány jen pro vzorek č. 3. Ostatní vzorky nebyly do takových hloubek leptány. Průběhy zbytkových napětí vyplývající z tabulky 25 jsou pak znázorněny v grafu 40.

Tab. 26 – Hodnoty zbytkových napětí

Vzorek	Ni-Fr-1	Ni-Fr-3	Ni-Fr-12	Ni-Fr-15	Ni-Fr-B1
hloubka H [mm]	skutečné ZN [N·mm ⁻²]	skutečné ZN [N·mm ⁻²]	skutečné ZN [N·mm ⁻²]	skutečné ZN [N·mm ⁻²]	skutečné ZN [N·mm ⁻²]
0,003	-243	579	-154	69	310
0,005	-189	467	-155	41	273
0,007	-151	377	-156	16	261
0,010	-114	251	-157	-18	265
0,015	-87	86	-159	-66	274
0,020	-82	-32	-161	-102	247
0,025	-84	-111	-162	-128	188
0,030	-86	-166	-163	-146	118
0,050	-61	-229	-157	-168	70
0,070	-37	-216	-141	-149	90
0,100	-20	-160	-112	-111	1
0,150	0	-120	-75	-72	-
0,200	-	-70	-35	-33	-
0,250	-	-32	-15	-10	-
0,300	-	-15	-	-	-

σ [MPa]

Zbytková napětí Inconel 713 LC



Graf 40 – Průběhy zbytkového napětí v závislosti na hloubce pro jednotlivé vzorky

11.6.5. Závěrečné vyhodnocení zbytkových napětí

Z grafu 40 je patrné, že ve všech frézovaných vzorcích převládá tlakové napětí. U vzorků obráběných velkou řeznou rychlostí a velkými posuvy je na povrchu napětí tahové, avšak v hloubkách 0,01 až 0,02 mm přechází v napětí tlakové. Tento tlak se s rostoucí hloubkou blíží k nule. U vzorků obráběných menší řeznou rychlostí a menšími posuvy se neobjevuje povrchový tah. Napětí je ryze tlakové a s rostoucí hloubkou se blíží k nulovým hodnotám.

Z grafu lze také vypočítat, že u nástroje s ostřejším úhlem čela jsou hodnoty napětí vyšší u menších řezných rychlostí. Dále u této geometrie je patrné, že od hloubky 0,05 mm jsou zbytkové napětí shodné a nezáleží na řezné rychlosti a posuvu.

Nástroje s úhlem čela -8° vykazují velký rozdíl zbytkových napětí vzhledem k řezné rychlosti a posuvu. U malé rychlosti převládá povrchový tlak $250 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, který rychle klesá do hloubky 0,01 mm. Následuje pozvolné přibližování nulového tlaku. U vysoké řezné rychlosti oproti tomu je v povrchu tah téměř $600 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. Následuje rychlý pád, při kterém toto napětí přechází v hloubce 0,02 mm v napětí tlakové. Největší tlakového napětí dosahuje vzorek v hloubce 0,05 mm a nabývá hodnoty $230 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$.

Broušený vzorek podle předpokladů vykazuje pouze tahové napětí. Toto napětí má klesající tendenci až do hloubky 0,1 mm, kde zcela mizí.

Z pohledu bezpečnosti je výhodnější, když se v obrobku nachází pouze tlakové napětí, neboť tahové může přispívat k výskytu a šíření povrchových trhlin. Z tohoto hlediska je zřejmé, že vhodnější je obrábění nižšími řeznými rychlostmi.

11.7. Závěr experimentální části

Při zjišťování silového účinku bylo kladně ověřeno tvrzení odborné literatury a odborníků z GE Aviation Czech, které uvádí 35 m/min jako nejvhodnější řeznou rychlost pro obrábění slitiny Inconel 713 LC. Při této řezné rychlosti jsou nejmenší řezné síly a jednotlivé složky rostou téměř lineárně v závislosti na rostoucím posuvu. Nejvhodnější úhel čela se pohybuje v rozmezí 1° až $5,5^\circ$. V této oblasti jsou hodnoty silového zatížení nejmenší. Exponenty mocninných funkcí měrných řezných sil u těchto geometrií vychází shodně $-0,46$, což je největší záporná hodnota z měřených geometrií. Z tohoto výsledku vyplývá, že měrná řezná síla při zvětšujícím se posuvu klesá nejrychleji u těchto úhlech čela.

Po vyhodnocení parametrů drsnosti bylo stanoveno, že nejvhodnější řezná rychlost je 35 m/min. Při obrábění právě touto řeznou rychlostí jsou parametry drsnosti R_a a R_z nejmenší. Dále z měření vyplývá, že nejmenší hodnoty drsností se dosahuje při použití nástroje s úhlem čela $5,5^\circ$. Při těchto dvou podmínkách se drsnost R_a pohybuje v rozmezí 0,3 až 0,5 μm a to pro posuvy 0,05 až 0,2 mm/z.



Ze získaných hodnot po měření opotřebení nástrojů bylo zjištěno, že se opotřebení nástroje při obrábění slitiny Inconel 713 LC se rapidně zvětšuje s rostoucí řeznou rychlostí a s rostoucím úhlem čela. Nejmenší hodnoty opotřebení byly zjištěny při použití nástroje s úhlem čela 1°. Nejvhodnější řezné rychlosti vzhledem k opotřebení jsou v rozmezí 20 až 35 m/min. Ekonomicky výhodnější je však větší řezná rychlost, a tak lze říci, že i vzhledem k opotřebení je nejvhodnější řezná rychlost 35 m/min.

Z měření mikrotvrdomosti v hloubkách po obrábění vyplývá, že u velkých úhlů čela nezávisí na řezných podmínkách pro tloušťku zpevněné vrstvy. Tloušťka této vrstvy se pohybuje v rozmezí 0,1 až 0,2 mm. Při menších úhlech čela pak záleží na řezných podmínkách. Při malých řezných rychlostech a malých posuvech je tloušťka zpevněné vrstvy asi 0,05 mm. Naopak při obrábění velkou řeznou rychlostí při větších posuvech je její tloušťka až 0,2 mm. Rozdíl mezi zpevněnou vrstvou a nezpevněnou je od 80 do 130 HV, což je značné. Při obrábění by to pak mohlo způsobovat velké problémy. Z tohoto důvodu je potřeba znát tloušťku zpevněné vrstvy, aby se mohla stanovit hodnota nejmenší odřezávané vrstvy, která by měla být vždy větší než tloušťka zpevněné vrstvy.

Z optické metalurgie, která byla provedena na shodných vzorcích jako mikrotvrdomost, nebyly patrné zřetelné strukturální změny. Vzhledem k rozdílným hodnotám mikrotvrdomosti povrchové vrstvy je pravděpodobné, že pro upřesnění mechanismů zpevnění by bylo zapotřebí provést podrobnější porovnání změn v této hrubozrnné matici.

Z experimentu, při kterém se měřilo a vyhodnocovalo zbytkové napětí po obrábění vyplývá, že u velkých řezných rychlostí se v obrobku objevuje povrchová vrstva vykazující tahová napětí, ale v hloubkách 0,01 až 0,02 mm přechází v napětí tlakové. Toto napětí se postupně zmenšuje limitně k nule. Při obrábění s nižší řeznou rychlostí se v obrobku objevuje pouze napětí tlakové. Obecně lze tedy říci, že vhodnější je obrábění nižšími řeznými rychlostmi, neboť tahové napětí je v obrobku nežádoucí vzhledem k jemu přispívání k šíření povrchových trhlin.

12. Závěr

Cílem diplomové práce bylo zhodnocení kvality povrchu obráběné niklové slitiny Inconel 713 LC na základě integrity povrchu a vliv na nástroje při jejím frézování. Součástí tohoto zhodnocení je analýza sil, které vznikají při čelním frézování, měření drsnosti povrchu a tvrdosti ve zpevněné povrchové vrstvě po obrábění a analýza zbytkových napětí. Zároveň bylo provedeno měření opotřebení nástrojů po obrábění.

Teoretická část obsahuje úvod do problematiky niklových slitin a jejich obrábění. Dále byla v teoretické části přiblížena problematika integrity povrchu a popsány metody jejich měření, včetně mechanismů opotřebení nástroje při obrábění.

Experimentální část je pak zaměřena na samotné měření a vyhodnocování sil při čelním frézování, opotřebení nástrojů a integrity povrchu s ohledem na různé řezné podmínky a různou geometrii nástroje. Součástí experimentální části je návrh a realizace experimentů v laboratořích Ústavu technologie obrábění projektování a metrologie FS ČVUT v Praze. Pro obrábění byla použita vertikální frézka, s nástrčnou čelní frézou s použitím čtyř druhů výměnných břitových destiček s úhly čel -8° ; 1° ; $5,5^\circ$ a 10° . K měření sil byl použit tříosý dynamometr. Pro měření drsnosti byl použit přenosný drsnoměr a měření opotřebení destiček bylo prováděno na digitálním mikroskopu. Ze vzorků na měření mikrotvrdoti a optické metalografie byl vyhotoven metalografický výbrus. Zbytková napětí byla měřena na aparatuře v laboratořích, která je k těmto zkouškám uzpůsobena.

Po vyhodnocení měření silového zatížení, drsností a opotřebení nástrojů vyplynulo, že nevhodnější řezná rychlost pro obrábění slitiny Inconel 713 LC je 35 m/min. Tato hodnota odpovídá i teoretickým předpokladům a praktickým poznatkům. Nejlepší úhel čela, vzhledem k těmto třem parametrům, se pohybuje v rozmezí 1° až $5,5^\circ$.

Po měření mikrotvrdoti se prokázalo, že tloušťka zpevněné vrstvy je od 0,05 až 0,2 mm. Záleží především na velikosti úhlu čela a na řezné rychlosti. Mikrotvrdot v povrchové vrstvě je větší o 80 až 130 HV. Tvrdost základního materiálu je pak asi 370 HV. Z uvedených poznatků vyplývá, že tloušťka zpevněné vrstvy je důležitá k určení hodnoty minimální odřezávané vrstvy, která by měla být větší, aby nedocházelo k obrábění v tvrdé oblasti. Z optické metalografie bohužel není jasné, jak ke zpevnění dochází. Je pouze zřejmé, že se zpevnění neprojevilo ve struktuře.

Z vyhodnocení zbytkových napětí vyplývá, že vhodnější je pro obrábění této slitiny používat nižší řeznou rychlost. Při obrábění vysokými rychlostmi dochází v povrchu obrobku k tahovému napětí. U nižších rychlostí povrchová vrstva není zatížena tahovým napětím a v obrobku je pouze napětí tlakové.



Opotřebení nástrojů bylo sledováno při krátkém experimentu a zde bylo prokázáno, že při velkých řezných rychlostech nástroje nevydrží teplotu, které jsou vystaveny. Pro komplexní monitorování opotřebení při obrábění Inconelu by bylo vhodné realizovat dlouhodobé zkoušky.

Práce naplnila stanovené cíle s uvedenými výsledky. Při dodržování zjištěných podmínek je možné obrábět slitinu Inconel 713 LC i přes její špatnou obrobitelnost.

13. Bibliografie

- [1] DONACHIE, Matthew a Stephen DONACHIE. *Superalloys: a technical guide*. 2nd ed. Materials Park, OH: ASM International, 2002. ISBN 08-717-0749-7.
- [2] ZHU, Dahu, Xiaoming ZHANG a Han DING. Tool wear characteristics in machining of nickel-based superalloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2013, **64**, 60-77. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.08.001. ISSN 08906955. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695512001575>
- [3] HERNAS, Adam. *Žárupevné oceli a slitiny*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2009. ISBN 978-80-248-2187-0.
- [4] *Nickel And Its Alloys* [online]. JLC Electromet Pvt. Ltd. - A major manufacturer of nickel alloys., b.r. [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <https://nickel-alloys.net/>
- [5] MADARIAGA, A., J. ESNAOLA, E. FERNANDEZ, P. ARRAZOLA, A. GARAY a F. MOREL. Analysis of residual stress and work-hardened profiles on Inconel 718 when face turning with large-nose radius tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014, **71**(9-12), 1587-1598. DOI: 10.1007/s00170-013-5585-6. ISSN 0268-3768. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-013-5585-6>
- [6] BARTHELMÄ, F., H. FRANK, M. SCHIFFLER a A. BARTSCH. Hard Coatings to Improve the Machining of Nickel Based Materials. *Procedia CIRP*. 2016, **46**, 294-298. DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.069. ISSN 22128271. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827116302566>
- [7] OBIKAWA, Toshiyuki, Masashi YAMAGUCHI, Kazuhiro FUNAI, Yasuhiro KAMATA a Sachio YAMADA. Air jet assisted machining of nickel-base superalloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2012, **61**, 20-26. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.05.005. ISSN 08906955. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695512000818>
- [8] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [9] Drsnost povrchu dle DIN EN ISO. *HOMMEL CS s.r.o.* [online]. b.r. [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <https://www.hommel-etamic.cz/cz/technicke-informace/drsnost-povrchu-dle-din-en-iso/>
- [10] JURENA, Pavel. *Snímání a hodnocení jakosti broušeného povrchu kontaktním a bezkontaktním způsobem*. Zlín, 2011. Diplomová práce. FT UTB ve Zlíně. Vedoucí práce Vladimír Pata.
- [11] Měření drsnosti povrchu. *Měřící přístroje - tloušťkoměry, leskoměry, tvrdoměry - Proinex* [online]. b.r. [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: https://www.proinex.cz/cs/blog/10_mereni-drsnosti-povrchu

- [12] KEHLER, Roman. *Měření drsnosti povrchů*. České Budějovice, 2014. Bakalářská práce. PF JU v Českých Budějovicích. Vedoucí práce Pavel Kříž.
- [13] Měření drsnosti. *M&B Calibr* [online]. b.r. [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <https://www.mbcaltibr.cz/mereni-drsnosti.html>
- [14] NETOLICKÁ, Eliška. *Parametry řezného procesu*. Praha, 2016. Bakalářská práce. FS ČVUT v Praze. Vedoucí práce Vítězslav Rázek.
- [15] NESLUŠAN, Miroslav. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2007. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [16] HOVĚZÁK, Josef. *Zahľubování otvorů pro hlavy šroubů*. Zlín, 2014. Bakalářská práce. FT UTB ve Zlíně. Vedoucí práce Josef Hrdina.
- [17] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN ISBN978-80-01-03752-2.
- [18] DE VOS, Patrick. Příručka pro technology - Jak je to s řeznými silami?. *MM Průmyslové spektrum* [online]. b.r., **2012**(3) [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-je-to-s-reznymi-silami.html>
- [19] CHILDS, Thomas. *Metal machining: theory and applications*. New York: Wiley, 2000. ISBN 03-406-9159-X.
- [20] BRYCHTA, Josef. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [21] HORÁK, Jan. *Hodnocení obrobiteľnosti polymerů při vrtání*. Zlín, 2014. Diplomová práce. FT UTB ve Zlíně. Vedoucí práce Imrich Lukovics.
- [22] VAŠÍČEK, Jiří. *Silové zatížení řezných nástrojů při frézování*. Brno, 2014. Diplomová práce. FSI VUT v Brně. Vedoucí práce Aleš Polzer.
- [23] DRÁBEK, Tomáš. *Problematika obrábění titanových slitin*. Brno, 2013. Diplomová práce. FSI VUT v Brně. Vedoucí práce Josef Sedlák.
- [24] Test & Measurement Force and Strain: Measurement Equipment for Demanding T&M Applications. *KISTLER* [online]. Hook, 2019 [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/?type=669&fid=361&model=download&callee=frontend>
- [25] PROCHÁZKA, Luděk. *Silové zatížení frézovacích nástrojů při obrábění*. Brno, 2018. Diplomová práce. FSI VUT v Brně. Vedoucí práce Aleš Polzer.
- [26] TRČKA, Tomáš. *Analýza silového zatížení stopkových fréz s PCD s ohledem na jejich ostření*. Brno, 2017. Diplomová práce. FSI VUT v Brně. Vedoucí práce Aleš Polzer.
- [27] SMOLA, Jiří. *Řezný proces a parametry povrchu při obrábění slitin titanu*. Praha, 2017. Bakalářská práce. FS ČVUT v Praze. Vedoucí práce Vítězslav Rázek.

- [28] *TECHNOLOGIE I: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 1. část: Studijní opory* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství., 2003 [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/oporysave/TI_TO-1cast.pdf
- [29] Chp 05-02 Numerical Control Programming. *East Tennessee State University* [online]. 2002 [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <http://faculty.etsu.edu/hemphill/entc3710/nc-prog/nc-05-02.htm>
- [30] Sousedné frézování nebo nesousedné frézování. *Sandvik Coromant* [online]. b.r. [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/up-milling-vs-down-milling.aspx>
- [31] DRIENSKY, Dušan. *Strojní obrábění II: frézování : učeb.text pro stř.odb.učiliště*. Praha: SNTL, 1991. ISBN 80-030-0335-0.
- [32] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [33] PETŘÍK, Jan. Obrobitelnost a vlastnosti obráběných materiálů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. b.r. [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/obrobitelnost-a-vlastnosti-obrabenych-materialu.html>
- [34] BILÍK, Oldřich. *Obrábění II: [Určeno pro posl. 4. roč. fak. stroj.]*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1994. ISBN 80-707-8228-5.
- [35] THAKUR, A. a S. GANGOPADHYAY. State-of-the-art in surface integrity in machining of nickel-based super alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2016, **100**, 25-54. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2015.10.001. ISSN 08906955. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695515300730>
- [36] DEVILLEZ, A., G. LE COZ, S. DOMINIAK a D. DUDZINSKI. Dry machining of Inconel 718, workpiece surface integrity. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011, **211**(10), 1590-1598. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.04.011. ISSN 09240136. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013611001208>
- [37] NOSEK, Jan. *Nástroje z rychlořezné oceli a jejich aplikace v současnosti*. Brno, 2008. Bakalářská práce. FSI VUT v Brně. Vedoucí práce Petra Cihlářová.
- [38] ČSN ISO 513. *Klasifikace a použití tvrdých řezných materiálů k obrábění kovů určeným ostřím: Označování skupin a podskupin použití*. 4. vydání. 2012.
- [39] Nástrojové materiály. *Sandvik Coromant* [online]. b.r. [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>
- [40] DOLEŽAL, P. a B. PACAL. *Hodnocení mikrotvrlosti struktur materiálů*. [online]. Vysoké učení technické v Brně, 2007 [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/hmsm/index.htm>



- [41] BAUER, Tomáš. *Kvalita povrchu po obrábění*. Praha, 2017. Bakalářská práce. FS ČVUT v Praze. Vedoucí práce Vítězslav Rázek.
- [42] HANÁK, Roman. *Měření tvrdosti konstrukčních ocelí*. Zlín, 2013. Bakalářská práce. FT UTB ve Zlíně. Vedoucí práce David Maňas.
- [43] ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse: Část 1: Zkušební metoda*. 2018.
- [44] Hardness testing of dental materials and tooth substance. *Nordic Institute of Dental Materials* [online]. b.r. [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <https://niom.no/hardness-testing-of-dental-materials-and-tooth-substance/>
- [45] NĚMEC, K. *Vliv podmínek zatěžování na strukturu a vlastnosti litých niklových superslitin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005. ISBN 80-214-2290-4.
- [46] KOLAŘÍK, K. a N. GANEV. Difrakční a tenzometrická analýza povrchů ocelí po nekonvenčních metodách obrábění. *Materials Structure in Chemistry, Biology, Physics and Technology - Bulletin of the Czech and Slovak Crystallographic Association*. [online]. b.r. [cit. 2019-05-25]. ISSN 1211-5894. Dostupné z: <http://www.xray.cz/ms/bul2006-2/kolarik.pdf>