

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T004 Strojírenská technologie – technologie  
obrábění

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Analýza procesu obrábění tvrdých povlaků z hlediska technologických  
parametrů a konstrukce nástroje

Autor: **Bc. Tomáš Zatloukal**

Vedoucí práce: **Ing. Miroslav Gombár, Ph.D.**

Akademický rok 2017/2018

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta strojní  
Akademický rok: 2017/2018

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš ZATLOUKAL**  
Osobní číslo: **S16N0062P**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojírenská technologie - technologie obrábění**  
Název tématu: **Analýza procesu obrábění tvrdých povlaků z hlediska technologických parametrů a konstrukce nástroje**  
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod
2. Analýza současného stavu a teoretická východiska pro řešení předmětu výzkumu
3. Návrh a realizace experimentálního plánu
4. Diskuze výsledků experimentálního ověření
5. Technické a ekonomické zhodnocení
6. Závěr

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah kvalifikační práce: **50 - 70 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- Beňo, Jozef. Teória rezania kovov. Košice: Viena, 1999. 255 s. ISBN 80-7099-429-0.
- Beňo, Jozef. Teoretické základy inovačných technológií. Košice: Sjf TU v Košiciach. 2010. ISBN 978-80-553-0449-6.
- Vasilko, Karol. Teória rezného procesu. Prešov: FVT, 2006, 115 s., ISBN80-8073-586-7.
- Vasilko, Karol. Analytická teória trieskového obrábania. Prešov: FVT, 2007, 338 s., ISBN 978-80-8073-759-7.
- Vasilko, Karol. Teória a prax trieskového obrábania, Prešov: Fakulta Výrobných Technológií (FVT), 2009, 529 s., ISBN 978-80-553-0152-5.
- Neslušan, Miroslav et al. Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní. Žilina: Edis, 2007,354 s. ISBN 978-80-8070-711-8.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Miroslav Gombár, PhD.**  
Regionální technologický institut  
Konzultant diplomové práce: **Ing. Jan Kutlwašer**  
Regionální technologický institut

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2017**  
Termín odevzdání diplomové práce: **21. května 2018**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.  
děkan



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

V Plzni dne 18. října 2017

## **Prohlášení o autorství**

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

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

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Miroslavu Gombárovi, PhD. a celému týmu SGS za jejich odborné a užitečné rady, které mi během vypracování diplomové práce poskytovali. Také bych chtěl velmi poděkovat své rodině a blízkým za jejich podporu během mého studia.

# ANOVAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Zatloukal	Jméno Tomáš	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	B2301 – Strojírenská technologie – technologie obrábění		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Gombár, PhD.	Jméno Miroslav	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST - KTO		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del><b>BAKALÁŘSKÁ</b></del>	Nehodící se škrtněte
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Analýza procesu obrábění tvrdých povlaků z hlediska technologických parametrů a konstrukce nástroje		

<b>FAKULTA</b>	Strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2018
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

**POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)**

<b>CELKEM</b>	111	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	88	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	23
---------------	-----	---------------------	----	----------------------	----

<b>STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Tato diplomová práce se zabývá obrobiteľnosťou žiarového nástriku slitiny Stellite 6 definovanou geometrií břitů. Na úvod práce je zpracována rešeršní a teoretická časť. Následuje experiment s popisem potrebného vybavení pro jeho realizaci. Poté je popsán průběh a jeho výsledky. Na závěr je provedeno technicko – ekonomické hodnotenie.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	Stellite 6, Obrábění, nástroj, žárový nástřik, Catia V5, Inventor, vyhodnocení, obrábění, drsnost, opotřebenění, chemický rozbor, hloubka řezu, řezná rychlost, úhel čela

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Zatloukal	Name Tomáš	
<b>FIELD OF STUDY</b>	B2301 - Manufacturing proces – Technology of metal cutting		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Gombár, PhD.	Name Miroslav	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KTO		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Analysis of the process of shaping hard coatings in terms of technological parameters and tool construction		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KTO	<b>SUBMITTED IN</b>	2018
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

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

<b>TOTALLY</b>	111	<b>TEXT PART</b>	88	<b>GRAPHICAL PART</b>	23
----------------	-----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	This diploma thesis deals with the machinability of thermal spray coating of the Stellite 6 alloy defined by the geometry of the cutting edge. A research and theoretical part is worked out at the beginning of the thesis. The experiment will then be created and a description of the necessary equipment for its realization. The progress and results of the evaluation are then described. At the end, the technical – economic evaluation is done.
<b>KEY WORDS</b>	Stellite 6, shaping, tool, thermal spraying, Catia V5, Inventor, evaluation, machining, roughness, wear, chemical analysis, cutting depth, cutting speed, rake angle

## OBSAH

1	Úvod .....	7
1.1	Cíle diplomové práce .....	8
2	Analýza současného stavu a teoretická východiska pro řešení předmětu výzkumu .....	9
2.1	Rešeršní část .....	9
2.2	Slitiny na bázi kobaltu (Co) a chromu (Cr).....	19
2.3	Stellite 6 a jeho obrobiteľnosť.....	19
2.4	Princip vytváření žárových nástřiků.....	22
2.4.1	Procesní parametry .....	22
2.5	Rozdělení žárových nástřiků .....	23
2.5.1	Nástřik elektrickým obloukem .....	24
2.5.2	Plazmový nástřik .....	25
2.5.3	Nástřik za studena .....	26
2.5.4	Nástřik plamenem .....	27
2.5.5	Detonační nástřik.....	28
2.5.6	Vysokorychlostní nástřik plamenem (HVOF) .....	29
2.5.7	Vzájemné porovnání metod žárových nástřiků .....	30
2.6	Struktura žárového nástřiku vyrobeného metodou HVOF .....	31
3	Oblast – OBRÁŽENÍ .....	33
3.1	Proces obrážení .....	33
3.2	Obrážecí stroj .....	34
3.3	Variety obrážecího nože.....	35
3.4	Geometrie nástroje – VBD.....	36
4	Praktická část.....	38
4.1	Plán experimentu.....	38
4.2	Obrábecí stroj .....	39
4.3	Řezný nástroj.....	39
4.4	Obrobek s žárovým nástřikem Stellite 6 .....	42
4.5	Přípravek pro upnutí obrobku .....	43
4.6	Řezné podmínky.....	44
4.7	Průběh experimentu.....	44
4.8	Celkové shrnutí .....	45
5	Vyhodnocení experimentu .....	46
5.1	Rozbor žárového nástřiku.....	46



5.1.1	Měření tloušťky povlaku .....	46
5.1.2	Měření mikrotvrdosti povlaku.....	47
5.1.3	Metalografický rozbor.....	48
5.1.4	Chemický rozbor povlaku .....	49
5.2	Měření drsnosti obrobeného povlaku.....	50
5.3	Měření profilu obrobeného povlaku.....	53
5.4	Opotřebení břitové destičky .....	56
5.5	Záznamy z vysokorychlostní kamery.....	58
5.5.1	Hodnocení tvorby třísky.....	58
5.5.2	Měření rychlosti obrážecího stroje.....	61
5.6	Statistické vyhodnocení.....	63
5.6.1	Hodnocení parametru Rt .....	64
5.6.2	Hodnocení parametru Ra.....	71
5.6.3	Hodnocení parametru Rz.....	75
5.6.4	Hodnocení parametru Rq .....	80
6	Technicko – ekonomické hodnocení.....	86
6.1	Broušení .....	87
6.2	Obrázení .....	88
6.3	Porovnání nákladů.....	89
7	Závěr.....	90
8	Seznam použité literatury.....	91
9	Seznam příloh.....	94

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Proces nanášení žárového nástřiku Stellite 6 [4].....	12
Obrázek 2 - Použité varianty řezného nástroje [4].....	13
Obrázek 3 - Průběh experimentu Ing. Jana Kašpara [5] .....	15
Obrázek 4 - Řezný nástroj použitý v experimentu Ing. Kološe [6].....	17
Obrázek 5 - Vylamování žárového nástřiku Stellite 6 [6].....	18
Obrázek 6 - Bodová koroze korozivzdorné oceli [12] .....	21
Obrázek 7 - Aplikace žárového nástřiku na povrch válce [11] .....	21
Obrázek 8 - Princip vytváření žárových nástřiků [14] .....	22
Obrázek 9 - Schéma struktury žárového nástřiku [17].....	23
Obrázek 10 - Schéma metody nástřiku elektrickým obloukem [14].....	24
Obrázek 11 - Schéma metody plazmového nástřiku [14] .....	25
Obrázek 12 - Schéma metody nástřiku za studena [18] .....	26
Obrázek 13 - Schéma metody nástřiku plamenem [14] .....	27
Obrázek 14 - Schéma detonačního nástřiku [16] .....	28
Obrázek 15 - Schéma HVOF metody [14].....	29
Obrázek 16 - Schéma struktury žárového nástřiku [14].....	31
Obrázek 17 - Částečně natavená částice žárového nástřiku [7] .....	32
Obrázek 18 - Schéma ortogonálního volného řezání [13].....	34
Obrázek 19 - Schéma horizontálního obrážecího stroje [21].....	34
Obrázek 20 - Varianty obrážecího nože [22] .....	35
Obrázek 21 - Geometrie břitu obráběcího nože [23].....	36
Obrázek 22 - Diagram příčin a následků.....	38
Obrázek 23 - Obrážecí stroj Strigon GH560/U [26] .....	39
Obrázek 24 - Model obrážecího nože .....	40
Obrázek 25 - Varianty obrážecího nože .....	40
Obrázek 26 - Reálná podoba obrážecích nožů .....	41
Obrázek 27 - Břítová destička SCMW 120408 [28] .....	41
Obrázek 28 - Rozměry obrobku .....	42
Obrázek 29 - Polotovary s již nanesenou stelliteovou vrstvou [6] .....	43
Obrázek 30 - Přípravek pro upínání plechů .....	43
Obrázek 31 - Příprava experimentu .....	45
Obrázek 32 - Měření tloušťky nástřiku (Zeiss AXIO, zvětšení 50x).....	46
Obrázek 33 - Zkouška tvrdosti dle Vickerse (Olympus BX61, zvětšení 100x).....	47
Obrázek 34 - Světelná mikroskopie (Olympus BX61, leptáno, zvětšení 200x) .....	48
Obrázek 35 - Světelná mikroskopie (Olympus BX61, leptáno, zvětšení 1000x) .....	48
Obrázek 36 - Naměřené chemické složení obrobku.....	49
Obrázek 37 - Průběh měření drsnosti na Hommel Etamic T8000 .....	50
Obrázek 38 - Protokol o měření drsnosti obrobku s číslem 17 .....	51
Obrázek 39 - Křivka podílu materiálu neboli Abbottova křivka [32].....	52
Obrázek 40 - Průběh měření profilu na Hommel Etamic T8000 .....	53
Obrázek 41 - Popis opotřebení břitové destičky [13].....	56
Obrázek 42 - Použití VBD s očíslovanou řeznou hranou.....	56
Obrázek 43 - Průběh měření opotřebení na řezné hraně č. 22 .....	57
Obrázek 44 - Pohled na hřbet VBD s č. 20 .....	57

Obrázek 45 - Pohled kolmo na čelo VBD s č. 24 .....	58
Obrázek 46 - Snímek tvorby třísky u obrobku 7 ( $a_p = 0,1$ mm).....	59
Obrázek 47 - Snímek tvorby třísky u obrobku 8 ( $a_p = 0,3$ mm).....	59
Obrázek 48 - Snímek tvorby třísky u obrobku č. 14 .....	60
Obrázek 49 - Odtlačení nástroje u obrobku č. 23.....	60
Obrázek 50 - Průběh vyhodnocování řezné rychlosti .....	61
Obrázek 51 – Polotovár pro výpočet jednotkového strojního času a finanční náročnosti .....	86
Obrázek 52 - Schéma výpočtu strojního času při rovinném obvodovém broušení [36].....	87
Obrázek 53 - Schéma výpočtu jednotkového strojního času při obrábění [38] .....	88

## Seznam grafů

Graf 1 - Závislost řezné rychlosti na drsnosti povrchu [3].....	9
Graf 2 - Závislost posuvové rychlosti na drsnosti povrchu [3] .....	10
Graf 3 - Závislost hloubky řezu na drsnosti povrchu [3] .....	11
Graf 4 - Závislost posuvu na drsnosti obrobené plochy [5] .....	16
Graf 5 - Závislost kvality povrchu na sklonu ostří a posuvu [5].....	16
Graf 6 - Závislost tvrdosti Stellite 6 na teplotě [10].....	20
Graf 7 - Porovnání metod žárových nástřiků v závislosti na teplotě a rychlosti částic [19].....	30
Graf 8 - Abbottova křivka profilu pro obrobek 17 .....	52
Graf 9 - Měření profilu na obrobku č. 1 ( $a_p = 0,1$ mm).....	54
Graf 10 - Měření profilu na obrobku č. 2 ( $a_p = 0,3$ mm).....	54
Graf 11 - Měření profilu na obrobku č. 3 ( $a_p = 0,1$ mm).....	55
Graf 12 - Měření profilu na obrobku č. 4 ( $a_p = 0,3$ mm).....	55
Graf 13 - Naměřené maximální hodnoty při 12 kmitů/s (osa y v mm/s] .....	62
Graf 14 - Naměřené maximální hodnoty při 18 kmitů/s (osa y v mm/s] .....	62
Graf 15 - Naměřené maximální hodnoty při 25 kmitů/s (osa y v mm/s] .....	62
Graf 16 - Naměřené maximální hodnoty při 35 kmitů/s (osa y v mm/s] .....	63
Graf 17 - Vliv nastavení úhlu čela na parametr drsnosti $R_t$ .....	66
Graf 18 - Vliv řezné rychlosti na parametr drsnosti $R_t$ .....	67
Graf 19 - Vliv hloubky řezu na parametr drsnosti $R_t$ .....	67
Graf 20 - Vliv nastavení úhlu čela a řezné rychlosti na parametr drsnosti $R_t$ .....	68
Graf 21 - Vliv řezné rychlosti a hloubky řezu na parametr drsnosti $R_t$ .....	68
Graf 22 - Vliv nastavení úhlu čela a hloubky řezu na parametr drsnosti $R_t$ .....	69
Graf 23 - Vliv nastavení úhlu čela, hloubky řezu a řezné rychlosti na parametr $R_t$ .....	69
Graf 24 – Grafické vyjádření architektury sítě pro parametr $R_t$ .....	70
Graf 25 - Graf znázorňující relativní vliv prediktoru pro parametr $R_t$ .....	70
Graf 26 - Vliv nastavení úhlu čela na parametr drsnosti $R_a$ .....	71
Graf 27 - Vliv řezné rychlosti na parametr drsnosti $R_a$ .....	71
Graf 28 - Vliv hloubky řezu na parametr drsnosti $R_a$ .....	72
Graf 29 - Vliv nastavení úhlu čela a řezné rychlosti na parametr drsnosti $R_a$ .....	72
Graf 30 - Vliv řezné rychlosti a hloubky řezu na parametr drsnosti $R_a$ .....	73
Graf 31 - Vliv nastavení úhlu čela a hloubky řezu na parametr drsnosti $R_a$ .....	73
Graf 32 - Vliv nastavení úhlu čela, hloubky řezu a řezné rychlosti na parametr $R_a$ .....	74
Graf 33 - Grafické vyjádření architektury sítě pro parametr $R_a$ .....	74
Graf 34 - Graf znázorňující relativní vliv prediktoru pro parametr $R_a$ .....	75

Graf 35 - Vliv nastavení úhlu čela na parametr drsnosti Rz .....	75
Graf 36 - Vliv řezné rychlosti na parametr drsnosti Rz .....	76
Graf 37 - Vliv hloubky řezu na parametr drsnosti Rz .....	76
Graf 38 - Vliv nastavení úhlu čela a řezné rychlosti na parametr drsnosti Rz.....	77
Graf 39 - Vliv řezné rychlosti a hloubky řezu na parametr drsnosti Rz.....	77
Graf 40 - Vliv nastavení úhlu čela a hloubky řezu na parametr drsnosti Rz.....	78
Graf 41 - Vliv nastavení úhlu čela, hloubky řezu a řezné rychlosti na parametr Rz.....	78
Graf 42 - Grafické vyjádření architektury sítě pro parametr Rz .....	79
Graf 43 - Graf znázorňující relativní vliv prediktoru pro parametr Rz .....	79
Graf 44 - Vliv nastavení úhlu čela na parametr drsnosti Rq .....	80
Graf 45 - Vliv řezné rychlosti na parametr drsnosti Rq .....	80
Graf 46 - Vliv hloubky řezu na parametr drsnosti Rq .....	81
Graf 47 - Vliv nastavení úhlu čela a řezné rychlosti na parametr drsnosti Rq.....	81
Graf 48 - Vliv řezné rychlosti a hloubky řezu na parametr drsnosti Rq .....	82
Graf 49 - Vliv nastavení úhlu čela a hloubky řezu na parametr drsnosti Rq .....	82
Graf 50 - Vliv nastavení úhlu čela, hloubky řezu a řezné rychlosti na parametr Rq .....	83
Graf 51 - Grafické vyjádření architektury sítě pro parametr Rq .....	83
Graf 52 - Graf znázorňující relativní vliv prediktoru pro parametr Rq.....	84
Graf 53 - Vliv nastavení úhlu čela na drsnost obrobeného povrchu .....	84
Graf 54 - interakce řezné rychlosti s hloubkou řezu na drsnosti obrobeného povrchu .....	84
Graf 55 - Porovnání technologií z hlediska jednotkového strojního času.....	89

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Plán experimentu s naměřenými drsnostmi [4] .....	13
Tabulka 2 - Naměřené hodnoty drsností Ra [6] .....	18
Tabulka 3 - Naměřené hodnoty drsností Rz [6] .....	18
Tabulka 4 - Chemické složení slitiny Stellite 6 [10].....	19
Tabulka 5 - Mechanické vlastnosti Slitiny Stellite 6 [10].....	20
Tabulka 6 - Parametry obrážečky Strigon GH560/U [26] .....	39
Tabulka 7 - Chemické složení oceli 42CrMo4 [27].....	40
Tabulka 8 - Plán experimentu .....	44
Tabulka 9 - Celkové shrnutí plánu experimentu .....	45
Tabulka 10 - Naměřené hodnoty tvrdosti dle Vickerse.....	47
Tabulka 11 - Chemické složení slitiny Stellite 6 podle tabulek [10] .....	49
Tabulka 12 - Popis měřených parametrů drsnosti .....	50
Tabulka 13 - Výpočet a ověření rychlostí obrážecího stroje.....	61
Tabulka 14 - Tabulka významnosti modelu zkoumaného parametru Rt .....	64
Tabulka 15 - Vliv faktorů na zkoumaném parametru Rt .....	64
Tabulka 16 - Deskriptivní statistika parametru Rt podle jednotlivých proměnných .....	66

## Seznam použitých zkratk a symbolů

VBD	Výměnná břitová destička
HVOF	High Velocity Oxygen Fuel
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni
FST	Fakulta strojní
KTO	Katedra technologie obrábění
IC20	Druh Slinutého karbidu
SK	Slinutý karbid
HV	Tvrдость dle Vickerse
HV <sub>0,1</sub>	Mikrotvrдость dle Vickerse
HRC	Tvrдость podle Rockwella
P	Parametr vypočítaný ze základního profilu
R	Parametr vypočítaný z profilu drsnosti
W	Parametr vypočítaný z profilu vlnitosti

Značka	Popis	Jednotky
$v_c$	Řezná rychlost	[m/min]
$a_p$	Hloubka řezu	[mm]
$f_{ot}$	Posuv na otáčku	[mm/ot]
$b$	Šířka řezu	[mm]
$h$	Hloubka řezu	[mm]
$r_n$	Poloměr zaoblení řezné hrany	[ $\mu$ m]
$m$	Hmotnost	[kg]
$r$	Poloměr břitové destičky	[Mm]
Rt, Wt, Pt	Celková výška profilu	[ $\mu$ m]
Rz, Wz, Pt	Nejvyšší výška profilu	[ $\mu$ m]
Ra, Wa, Pa	Průměrné aritmetická hodnota	[ $\mu$ m]
Rsm	Průměrná šířka prvků profilu	[mm]
Rk	Hloubka jádra profilu drsnosti	[ $\mu$ m]
Rmr1, Rmr2	Materiálový podíl	[ $\mu$ m]
Rpk	Redukované výšky výstupků	[%]
Rvk	Redukované hloubky prohlubní	[%]
Rm	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
Re	Mez pevnosti v kluzu	[MPa]
$t_{AS}$	Jednotkový strojní čas	[min]

## 1 Úvod

V současné době se stále více zvyšují požadavky na materiály používané ve strojírenském průmyslu. S vývojem nových materiálů se rovněž klade důraz na integritu povrchu. V určitých případech je potřeba, aby vyrobená součást dokázala odolávat velmi náročným podmínkám v provozu. Toho se dá docílit několika způsoby. Mezi nejznámější varianty lze považovat chemické a tepelné zpracování, mezi které se řadí například kalení, popouštění, cementování, nitridování atd. Další možnost, která se v současné době využívá, je použití žárových nástřiků z velmi odolných materiálů.

Žárové nástřiky jsou prakticky nezastupitelnou technologií v mnoha odvětvích. Jejich největší přednosti jsou zvýšená odolnost proti mechanickému opotřebení, chemickému prostředí, korozi a oxidaci. Velmi dobře také odolávají vysokým teplotám. Je mnoho oblastí, ve kterých je možné se s žárovými nástřiky setkat. Uvedme například všeobecné strojírenství, kde jsou tyto nástřiky aplikovány na čerpací a hydraulickou techniku pro zvýšení odolnosti proti opotřebení a korozi. Své využití nalézá i v tiskařském průmyslu, kde jsou nástřiky nanášeny na povrchy tiskařských válců. V energetickém průmyslu jsou využívány jako tepelná bariéra, ochrana proti kavitaci, erozi a horké korozi. V neposlední řadě jsou žárové nástřiky velmi využívány v automobilovém a leteckém průmyslu, kde jsou nanášeny na díly spalovacích motorů pro zvýšení odolnosti proti opotřebení a vysoké teplotě. Vyjmenovat zde můžeme například písty, ventily, hlavy válců, čepy, klikové hřídele nebo vačky. [1]

U dílů spalovacích motorů, čerpací techniky nebo vstřikovacích forem je zároveň potřeba, aby hodnota drsnosti povrchu byla co nejmenší. S rostoucí drsností totiž vzniká riziko vzniku a šíření trhlin. Zhoršuje se tím také přesnost, životnost a v neposlední řadě i korozní odolnost součástí. Žárový nástřik se po nanesení na základní materiál vyznačuje hodnotou drsnosti okolo 6  $\mu\text{m}$ . Pro snížení drsnosti naneseného nástřiku se v současné době využívá především technologie broušení.

Ve strojírenství je známo, že s každou použitou technologií obrábění se do obráběného materiálu vnáší zbytková napětí. Ty lze rozdělit na zbytková napětí tahová a tlaková. Vznikají tak, že se obráběný materiál snaží vrátit do rovnovážného stavu. Typická operace pro vznik tahového zbytkového napětí je technologie broušení. Při broušení vzniká mezi brusným kotoučem a obráběnou plochou velké množství tepla, které prostupuje do obrobku, který po skončení procesu začíná chladnout. V materiálu se tím začnou vytvářet ona tahová zbytková napětí. Tahová napětí lze ve většině případů považovat za negativní jev. Při vzniku trhliny totiž napomáhají k jejímu šíření a zkracují tak životnost součásti. Při broušení lze zbytková napětí z části redukovat použitím chladicí kapaliny. Druhým typem jsou zbytková napětí tlaková. Ty vznikají při technologiích, kdy je povrchová vrstva obráběného materiálu plasticky deformována pomocí mechanického zatížení. Jedná se o technologie, jejichž nástroj má definovanou geometrii břitu jako jsou např. frézování, soustružení nebo obrážení. V případě vzniku trhliny se naopak tlaková zbytková napětí snaží trhlinu spíše uzavírat a tím prodlužovat již zmiňovanou životnost a to i v případech, kdy dochází k intenzivnímu mechanickému opotřebení. [13]

## 1.1 Cíle diplomové práce

Existuje několik druhů žárových nástřiků, které se dělí podle použitého materiálu pro nástřik. Tato diplomová práce se zabývá obrobitelností chrom – kobaltové slitiny Stellite 6. Tento materiál patří mezi těžkoobrobitelné materiály, z důvodu velkého množství tvrdých karbidů ve struktuře. Pro snížení drsnosti naneseného nástřiku se v současné době využívá především technologie broušení. Broušení těchto povlaků je poměrně časově náročné a tudíž neekonomické. Zároveň se vlivem zvýšené teploty při broušení vnaší již zmiňovaná zbytková tahová napětí do povrchu obrobku.

Hlavním cílem této diplomové práce je docílit stejné nebo lepší kvality povrchu žárového nástřiku Stellite 6, který je obráběn definovanou geometrií břitu při porovnání s technologií broušení. Výhody spočívají ve zkrácení výrobních časů obrábění a ve změně zbytkových tahových napětí na napětí tlaková. Úkolem je tedy zrealizovat experiment, při kterém dojde k ověření zmiňované myšlenky.

Této problematice se v minulosti věnovalo několik výzkumných pracovišť a univerzit včetně Západočeské univerzity v Plzni. Získané informace a výsledky z experimentů jsou pro nás určitým ukazatelem, jakým směrem pokračovat v řešení této problematiky. Informace načerpané z předchozích publikací a článků jsou shrnuty na následujících stránkách.

Po rešeršní části následuje část teoretická, kde si blíže popíšeme vlastnosti, chemické složení a strukturu, která vzniká po provedení nástřiku Stellite 6. Následně je vysvětlen samotný proces nanášení žárových nástřiků a způsoby ovlivnění tohoto procesu pomocí procesních parametrů. Část diplomové práce je věnována různým metodám nanášení, u kterých je vždy popsán princip metody, materiály pro které je metoda vhodná a na závěr popis jejich výhod a nevýhod. Teoretická část je zakončena teoretickou rozpravou o obrážecím procesu.

V praktické části se věnujeme již zmiňovanému experimentu, při kterém jsou definovány řezné podmínky, přípravek, obrážecí stroj, nástroj a obráběné polotovary. Po provedení experimentu se přesouváme do sekce vyhodnocení. Nejprve proběhl rozbor obráběného žárového nástřiku, při kterém bylo určeno chemické složení, tloušťka nástřiku, metalografický rozbor a měření mikrotvrdomosti dle Vickerse. Dále je hodnocena drsnost a profil obrobeného povrchu. Z těchto údajů bylo vytvořeno statistické vyhodnocení pro určení vlivů jednotlivých faktorů. Následoval rozbor a vyhodnocení záběrů z vysokorychlostní kamery s určením maximálních řezných rychlostí při obrážení. V neposlední řadě bylo měřeno opotřebení břitových destiček na čele a hřbetu.

Diplomová práce je zakončena výpočtem technicko – ekonomického hodnocení a závěrem, ve kterém jsou shrnuty dosažené výsledky provedeného experimentu a jeho vyhodnocení.

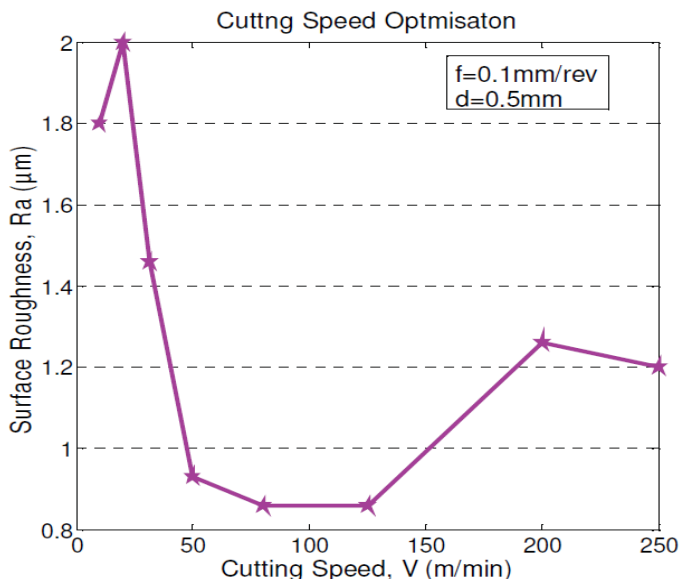
## 2 Analýza současného stavu a teoretická východiska pro řešení předmětu výzkumu

### 2.1 Rešeršní část

Prvním z uvedených článků, který se zabývá problematikou obrobitelnosti slitiny Stellite 6 je článek s názvem „Optimisation of the Machining of Stellite 6 PTA Hardfacing Using Surface Roughness“ [3]. Studie se zabývala obrobitelností žárového nástřiku Stellite 6, který byl nanesen metodou PTA na ocelovou tyč o průměru 100 mm s označením 4140 AISI. Metoda PTA neboli plazmové navařování se vyznačuje velmi vysokou adhezí pevností vlivem promísení žárového nástřiku se základním materiálem. Z tohoto důvodu je potřeba pro zhotovení povlaku požadovaných vlastností nanášet několik vrstev nástřiku. [3]

Celkem byly v experimentu zhotoveny čtyři obrobky s konstantní tloušťkou Stellite 6. Tloušťku nanesené vrstvy studie neprozrazuje. Technologie soustružení probíhala na konvenčním soustruhu Harrison M400 a na nástroji byly upevněny výměnné břitové destičky z materiálu slinitý karbid, které navíc obsahovali depoziční vrstvu s neupřesněným složením. Jedná se o VBD s hlavním ostřím  $95^\circ$ , úhlem čela s hodnotou  $-6^\circ$  a úhlem špičky 0,8 mm. Článek se zaměřuje především na hodnoty drsnosti  $R_a$  v závislosti na změně řezné rychlosti, posuvové rychlosti a hloubce řezu. [3]

Prvním uvažovaným parametrem byla řezná rychlost v rozsahu 10 m/min až 250 m/min v osmi krocích. Při změnách řezných rychlostí jsou zachovány zbylé parametry konstantní, jedná se o posuvovou rychlost s hodnotou  $f = 0,1$  mm/ot a hloubkou řezu  $a_p = 0,5$  mm. Při obrábění se zjistilo, že při rychlostech nad 200 m/min se na řezné hraně nástroje vytváří intenzivní opotřebení doprovázející i drobné jiskření. Drsnost se po obrobení měřila v několika částech třikrát a to po obvodu obrobku po  $120^\circ$ . Z grafu č. 1 je patrné, že nejlepší hodnoty drsnosti vznikly při řezných rychlostech 80 m/min a 125 m/min, při nichž se dosáhlo přibližné drsnosti  $0,86 \mu\text{m}$ . [3]

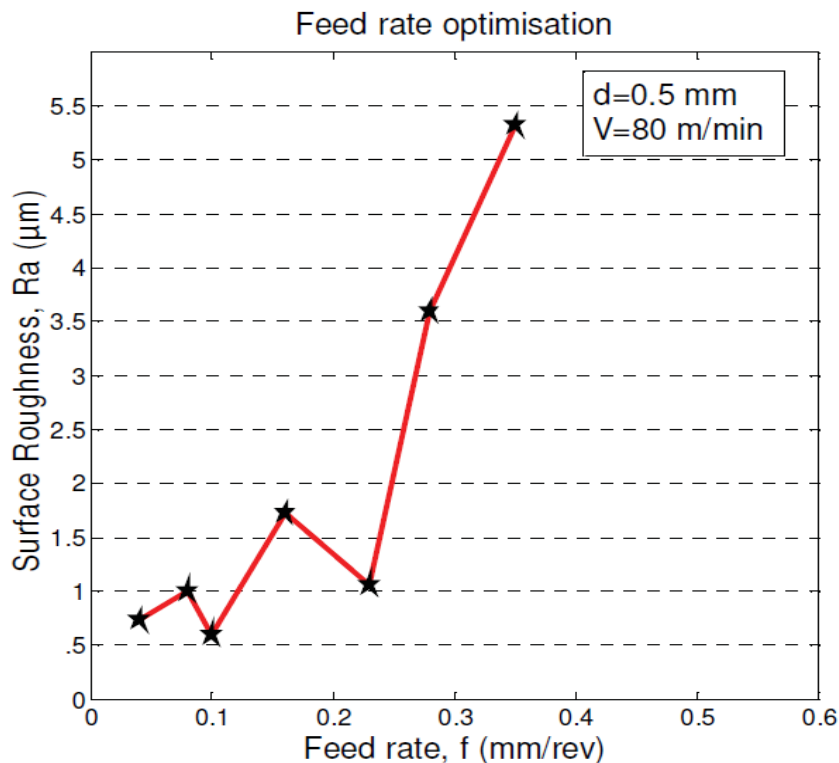


Graf 1 - Závislost řezné rychlosti na drsnosti povrchu [3]



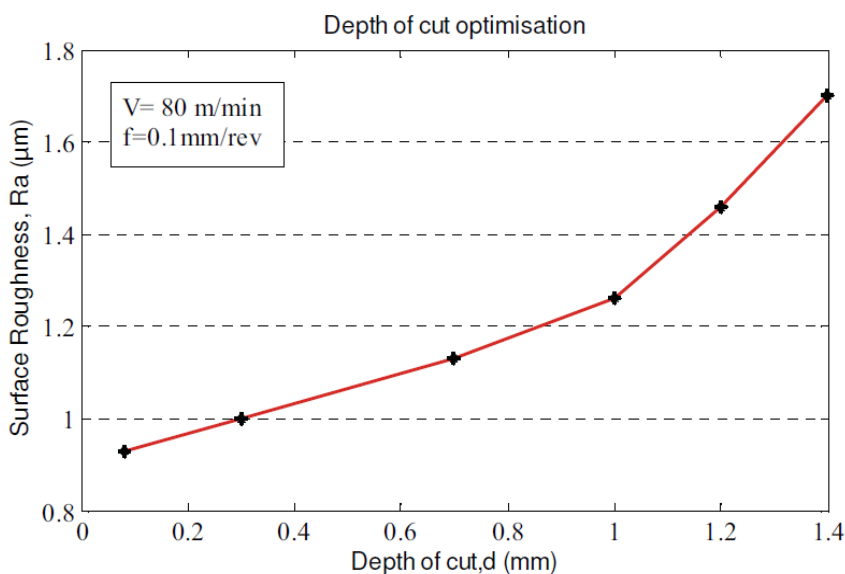
Z předchozího experimentu bylo zjištěno, že nejlepší výsledky drsností vycházely při rychlostech 80 m/min a 125 m/min. Toto zjištění se využilo při návrhu druhého experimentu, ve kterém se měnila posuvová rychlost v sedmi krocích v rozmezí od 0,04 mm/ot do 0,35 mm/ot. Konstantní řezná rychlost byla nastavena podle výsledků předchozího experimentu na  $v_c = 80$  m/min a hloubka řezu zůstala na neměnných  $a_p = 0,5$  mm. [3]

V průběhu experimentu bylo zpozorováno výrazné opotřebení VBD při posuvu  $f = 0,28$  mm/ot. Z toho plyne předpokládaná trvanlivost destičky přibližně pět minut při obrábění v těchto podmínkách. Pro pokračování experimentu bylo nutné opotřebenou destičku vyměnit za novou a dokončit obrábění při zbylých posuvech 0,3 mm/ot a 0,35 mm/ot. Graf č. 2 popisuje závislost posuvové rychlosti na kvalitě obrobeneho povrchu. Z grafu je zřejmé, že s narůstající posuvovou rychlostí se zhoršuje drsnost povrchu a naopak. Z grafu lze vyčíst to, že nejlepší výsledky drsností v rozmezí  $R_a = 0,6 - 1 \mu\text{m}$  byly dosaženy při nižších posuvech do  $f = 0,1$  mm/ot. [3]



Graf 2 - Závislost posuvové rychlosti na drsnosti povrchu [3]

V posledním případě se zkoumal vliv hloubky řezu na drsnost obrobeného povrchu. Způsob provedení třetího experimentu spočíval v obrábění polotovarů v šesti hloubkách řezu v rozsahu od 0,08 mm do 1,4 mm. Vyhodnocení probíhalo stejným způsobem jako v předchozích případech. Konstantní parametry se volily podle dosažených výsledků z předchozích pokusů, což bylo v případě řezné rychlosti  $v_c = 80$  m/min a posuvu s hodnotou  $f = 0,1$  mm/ot. Z uvedeného grafu je patrné, že s narůstající hloubkou řezu se drsnost povrchu zhoršuje. V tomto pokusu je pozoruhodný rozsah hloubky řezu, který se dostává až na hodnotu 1,4 mm. Žárové nástřiky mívají obvykle tloušťku pohybující se okolo 0,5 mm. Ve výjimečných případech může nástřík vytvořený plazmou dosahovat až 2 mm. Předpokládáme, že tento poznatek je uváděn jen pro potvrzení faktu, že s narůstající hloubkou řezu se drsnost povrchu zhoršuje, neboť nanášet základní povrchu nástříkem s takovou tloušťkou a následně jej obrábět s tak velkým úběrem nemá v praxi příliš velký smysl. [3]



Graf 3 - Závislost hloubky řezu na drsnosti povrchu [3]

Z úvodního článku jsme zjistili prvotní informace o tom, jak se chová Stellite 6 v průběhu obrábění a jaký vliv má způsob obrábění na výslednou kvalitu obrobeného povrchu. Z uvedených grafů můžeme obecně říct, že se žárový nástřík Stellite 6 chová podobně jako běžně obráběné oceli, u nichž je známo, že nejlepších hodnot kvality povrchu se dosahuje při menších hodnotách posuvové rychlosti a menších hloubkách řezu. Řezná rychlost má opačný smysl, ale při velmi vysokých řezných rychlostech dochází k intenzivnímu opotřebení nástroje.

Problematikou obrobitelnosti žárových nástřiků se zabývala i publikace s názvem „Machinability of Stellite-6 Coatings with Ceramic Inserts and Tungsten Carbide Tools“ [4]. Oproti předchozí popisované studii, která se zabývala pouze vhodnými řeznými podmínkami, se tato studie zaměřila nejen na řezné podmínky, ale také na rozdílnost řezných materiálů a jejich vliv na výslednou kvalitu povrchu. [4]

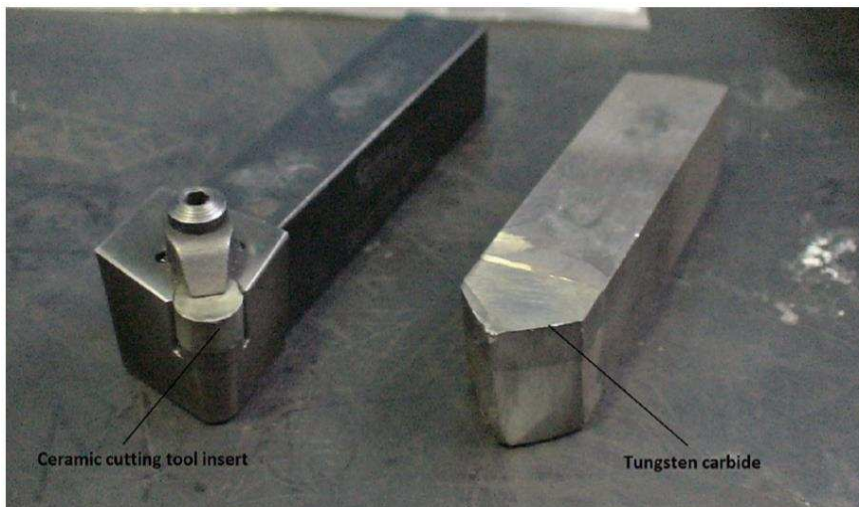
Test proběhl na univerzálním soustruhu SN55. Stelitová slitina byla nanášena na základní materiál z austenitické nerezové oceli s označením AISI 304. Obrobek měl tvar mezikruží o rozměrech: vnější průměr 200 mm, vnitřní průměr 170 mm a délkou 300 mm. Metoda nanášení se v článku blíže nespecifikuje, pouze poukazuje na to, že se jednalo o navařovací proces. Na žárový nástřik Stellite 6 byly zkoušeny dva typy řezných materiálů, které jsou podrobně popsány v následujících odstavcích. [4]



Obrázek 1 - Proces nanášení žárového nástřiku Stellite 6 [4]

V prvním případě se jednalo o keramickou břitovou destičku uchycenou v těle soustružnického nože. Keramická destička od firmy Sandvik nese označení RNGN 120700 T0 1020 a skládá se ze základního materiálu  $Al_2O_3$ , který je vyztužen tzv. whiskery. Tento typ destiček je podle tvrzení autorů studie vhodný pro vysokorychlostní obrábění slitin odolávajícím vysokým teplotám. Držák byl svým provedením konstruován tak, aby vložená destička zajišťovala negativní úhel čela s hodnotou  $-6^\circ$ . [4]

Ve druhém případě se využilo celistvého soustružnického nože s připájeným řezným břitem z karbidu wolframu třídy K20, který nebyl dále povlakován. Připájený břit má oproti keramické destičce pozitivní geometrii čela, jejíž hodnota není uvedena. Pro lepší představu jsou obě varianty řezných nástrojů zobrazeny na obrázku 2. [4]



Obrázek 2 - Použité varianty řezného nástroje [4]

Procesní kapalina byla užitá pouze u varianty s pájenou břitovou destičkou a jednalo se o olejovou emulzi nespecifikovaného složení. V případě obrábění keramickou destičkou probíhal celý proces bez použití jakékoliv procesní kapaliny. Řezné podmínky probíhaly v kombinacích změn řezné rychlosti a posuvu na otáčku. Hloubka řezu zůstala v celém experimentu na konstantní hodnotě  $a_p = 0,25$  mm. Řezná rychlost se pohybovala u varianty s keramickou destičkou na hodnotách  $v_c = 30 - 90$  m/min s třemi variantami posuvu v rozmezí  $f_{ot} = 0,25 - 0,35$  mm/ot. U nože s řeznou částí z karbidu wolframu byla snížena jednak řezná rychlost na hodnoty  $v_c = 30 - 50$  m/min a stejně tak byly sníženy hodnoty posuvu na  $f_{ot} = 0,1 - 0,20$  mm/ot. Detailní rozpracování celého plánu experimentu je zaznamenán v tabulce 1. [4]

Insert type	Cutting speed	Feed rate	Average surface	Tool type	Cutting speed	Feed rate	Average surface	
	(m/min)	(mm/rev)	roughness ( $\mu\text{m}$ )		(m/min)	(mm/rev)	roughness ( $\mu\text{m}$ )	
	$V$	$f$	$R_a$		$V$	$f$	$R_a$	
Whisker-reinforced ceramic CC670	30	0.25	2.48	Tungsten carbide	30	0.1	2.6	
		0.3	3.44			0.15	3.8	
			0.35			4.74	0.20	5.1
	50	0.25	2.42			40	0.1	2.1
		0.3	3.29				0.15	3.1
			0.35				4.63	0.20
	70	0.25	2.30		50	0.1	1.8	
		0.3	3.19			0.15	2.5	
			0.35			4.54	0.20	4.0
	90	0.25	2.21					
		0.3	3.10					
			0.35		4.40			

Tabulka 1 - Plán experimentu s naměřenými drsnostmi [4]

Ve stejné tabulce jsou zaznamenány i dosažené výsledky hodnot drsností. V případě obrábění s keramickou břitovou destičkou si lze všimnout, že nejlepší dosažená drsnost  $R_a = 2,21 \mu\text{m}$  byla dosažena při nejvyšší řezné rychlosti  $v_c = 90 \text{ m/min}$  a při nejmenší hodnotě posuvu  $f_{ot} = 0,25 \text{ mm/ot}$ . Při detailnějším porovnání jednotlivých variant je ale patrné, že řezná rychlost nemá tak zásadní vliv na hodnoty drsnosti na rozdíl od hodnot posuvu. Naměřené drsnosti se při zvolených hodnotách posuvu velmi podobají s tím, že se nepatrně zlepšují s narůstající řeznou rychlostí. [4]

Obdobný průběh se ukázal i při obrábění s pájenou destičkou z karbidu wolframu. Nejlepší hodnota drsnosti obrobeného povrchu  $R_a = 1,8 \mu\text{m}$  byla zaznamenána při nejvyšší řezné rychlosti  $v_c = 50 \text{ m/min}$  a nejmenším posuvu  $f_{ot} = 0,1 \text{ mm/ot}$ . Oproti předchozímu případu je z tabulky na první pohled zřejmé, že význam na hodnotu drsnosti má jednak parametr posuvu, ale i hodnota řezné rychlosti. Celkový průběh je však identický jako u předchozí varianty s keramickou břitovou destičkou. [4]

Na závěr lze říci, že v obou variantách se dosáhlo podobných výsledků kvality povrchu s tím, že o něco lépe vyšla varianta s pájenou destičkou z karbidu wolframu. To mohlo být zapříčiněno jednak výrazně menšími hodnotami posuvu a také použitím provozní kapaliny v podobě olejové emulze. V tomto článku se opět potvrzuje tvrzení, že lepších hodnot drsnosti povrchu se dosahuje při vyšších řezných rychlostech a menších hodnotách posuvu.

Problematika obrábění žárových nástřiků se na Katedře technologie obrábění řeší již několik let, kde jednou z diplomových prací zabývajících se tímto tématem je práce s názvem „Optimalizace technologických faktorů obrábění těžkoobrobitelných nástřiků experimentálními postupy zaměřenými na splnění funkčních vlastností“ [5]. V praktické části se Ing. Jan Kašpar zabýval problematikou soustružení slitiny Stellite 6 v souvislosti na kvalitu obrobeneho povrchu a opotřebením řezného nástroje s definovanou geometrií břitu při konstantní řezné rychlosti a hloubce řezu. [5]

Řezný nástroj byl navržen tak, aby na upnuté výměnné břitové destičce vyvozoval hydroplastické předpětí s cílem dosáhnout vyšší životnosti nástroje. Cermetové VBD po zbroušení imitovaly kruhové destičky o průměru 20 mm. Během experimentu se měnil sklon řezné hrany  $\lambda_f$  ve třech variantách. [5]

Experiment se prováděl na univerzálním hrotovém soustruhu CNC Kovosvit MT50. Polotovar se skládal z ocelového válce o průměru 150 mm z materiálu 12 050 dle ČSN, na který byl nanesen žárový nástřik Stellite 6 technologií HVOF. Na polotovaru byly označeny čtyři plochy oddělenými zápichy a každá plocha byla určena pro specifickou kombinaci řezných podmínek. [5]

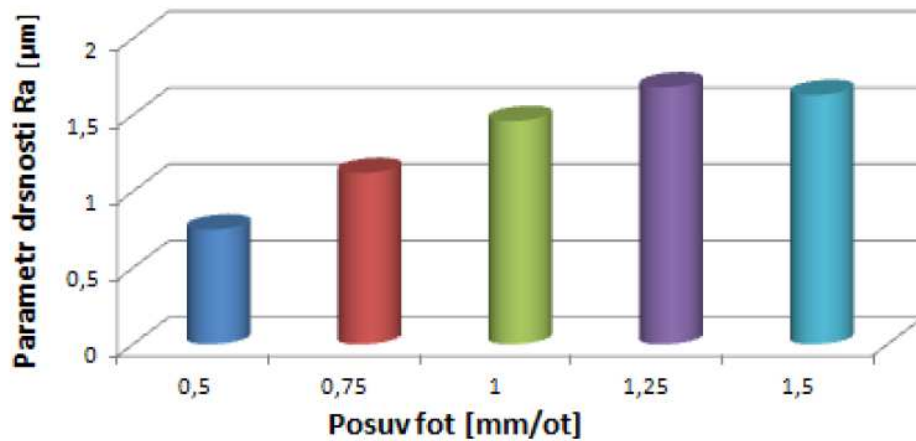


Obrázek 3 - Průběh experimentu Ing. Jana Kašpara [5]

Po celou dobu experimentu byla zachována konstantní řezná rychlost  $v_c = 15$  m/min a konstantní hloubka řezu  $a_p = 0,2$  mm. Měněnou veličinou byl posuv na otáčku v rozmezí  $f_{ot} = 0,5 - 1,5$  mm/ot. Jak již bylo uvedeno v předchozím odstavci, měnil se i sklon řezné hrany  $\lambda_f$  v hodnotách  $7^{\circ}, 0^{\circ}$  a  $-7^{\circ}$ . Celý proces probíhal s chlazením, které také plnilo funkci rychlejšího odvodu třísek z místa řezu, aby se zabránilo poškození již obrobeneho povrchu. [5]

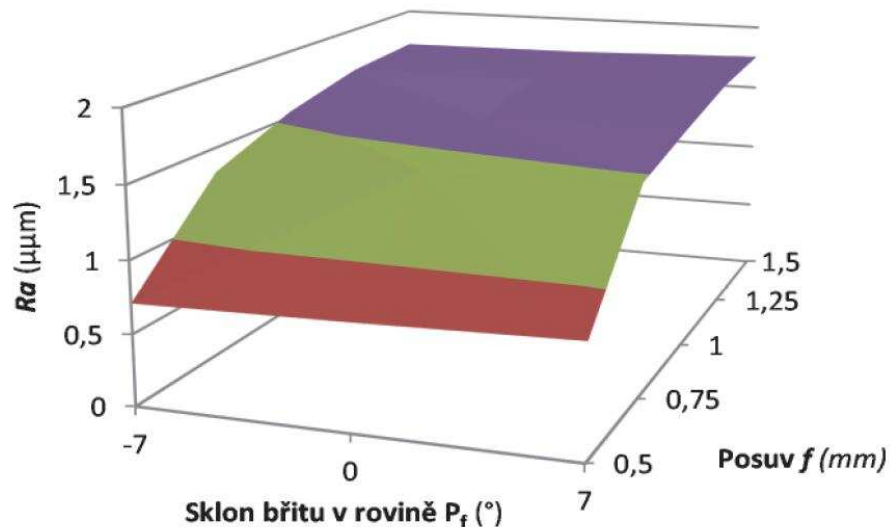
V první části vyhodnocení se student zaměřil na kvalitu obrobeneho povrchu pouze v závislosti na posuvu. Z grafu 4 můžeme vidět, že nejlepších hodnot kvality povrchu  $R_a = 0,7 - 0,8$   $\mu\text{m}$  bylo dosaženo při nejmenším zvoleném posuvu 0,5 mm/ot. Z grafu je dále patrné, že se opět kvalita povrchu  $R_a$  zhoršuje s narůstající hodnotou posuvu. [5]

### Porovnání hodnot parametru Ra při rozdílných posuvech



Graf 4 - Závislost posuvu na drsnosti obrobené plochy [5]

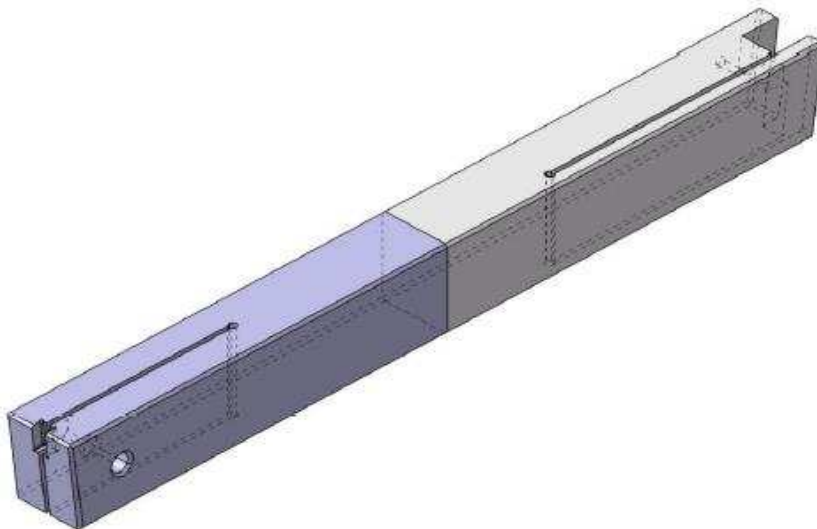
V druhé části student zohlednil i vliv nastavení sklonu ostří spolu s hodnotami posuvu ovlivňující kvalitu povrchu. Vyhodnocení proběhlo metodou plánovaného experimentu. Podle dosažených výsledků student došel k závěru, že v případě soustružení nemá geometrie nastavení sklonu ostří tak zásadní význam na výslednou kvalitu povrchu. V grafu číslo 5 jsou zaznamenány hodnoty drsností v závislosti na nastavení sklonu ostří a posuvu. Z grafu jasně vyplývá studentovo tvrzení, že hlavní vliv na měřenou drsnost povrchu měl právě posuv. [5]



Graf 5 - Závislost kvality povrchu na sklonu ostří a posuvu [5]

Poslední zde uvedenou skutečností vyzkoumanou na Katedře technologie obrábění pochází z diplomové práce Ing. Davida Kološe s názvem „Závislost vybraných parametrů hodnocení obrobených ploch tvrdých povlaků na konstrukci řezného nástroje“ [6]. V praktické části se zabýval obrobitelností žárového nástřiku Stellite 6 technologií obrábění. Student dále pokračoval v myšlence zvýšení životnosti řezného nástroje za pomoci vyvolání tlakového pnutí na řezné hraně břitové destičky. [6]

Ing. David Kološ provedl návrh speciálního obrážecího nože, který je zobrazen na obrázku 4. Zde je vidět princip vyvolání tlakového pnutí na již uloženou břitovou destičku. Destička byla vyříznuta z obdélníkového polotovaru ze slinutého karbidu SK K10 pomocí drátořezu. Žádné další úpravy VBD nenásledovali, neboť tvar samotného lůžka byl navržen tak, aby nastavení úhlu čela odpovídalo hodnotě  $+7^\circ$ . [6]



Obrázek 4 - Řezný nástroj použitý v experimentu Ing. Kološe [6]

Pro experiment byla použita horizontální obrážečka Strigon s označením GH 560/U, která se nachází v halových laboratořích Katedry technologie obrábění. Obrobkem byl plech o rozměrech 40 x 400 mm s šířkou 3 mm z oceli 11 373 dle ČSN. Na vrchní části obrobku byla nanесena vrstva žárového nástřiku Stellite 6 metodou HVOF s tloušťkou 0,4 – 0,5 mm. [6]

Jedinou variabilní veličinou byla hloubka řezu v rozmezí  $a_p = 0,2 - 0,4$  mm. Řezná rychlost po celý průběh experimentu zůstala konstantní na hodnotě  $v_c = 25$  m/min. Důležitým parametrem v geometrii nástroje je úhel čela, který dle vyrobeného nože nabyl hodnoty  $-7^\circ$ . Jelikož se jednalo o obdélníkovou břitovou destičku, úhel hřbetu byl  $+7^\circ$ . Každý řez probíhal bez procesní kapaliny a zaznamenával se na vysokorychlostní kameru FASTCAM SA-X 2RV pro detailnější vyhodnocení. [6]



Hlavním cílem po obrobení povrchu bylo zjistit kvalitu, respektive drsnost povrchu Ra a Rz. Vyhodnocení probíhalo na drsnoměru Mahr 300. Z výsledků naměřených hodnot drsností je patrné, že nedocházelo k výrazným odlišnostem při změnách hloubky řezu, nicméně z tabulek číslo 2 a 3 vyplývá skutečnost, že s narůstající hloubkou řezu se kvalita obrobeného povrchu zhoršuje. Nejlepší dosažená hodnota drsnosti Ra = 0,374  $\mu\text{m}$  byla naměřena při hodnotě  $a_p = 0,3$  mm, stejně vyšla nejlepší drsnost Rz = 1,912  $\mu\text{m}$ .

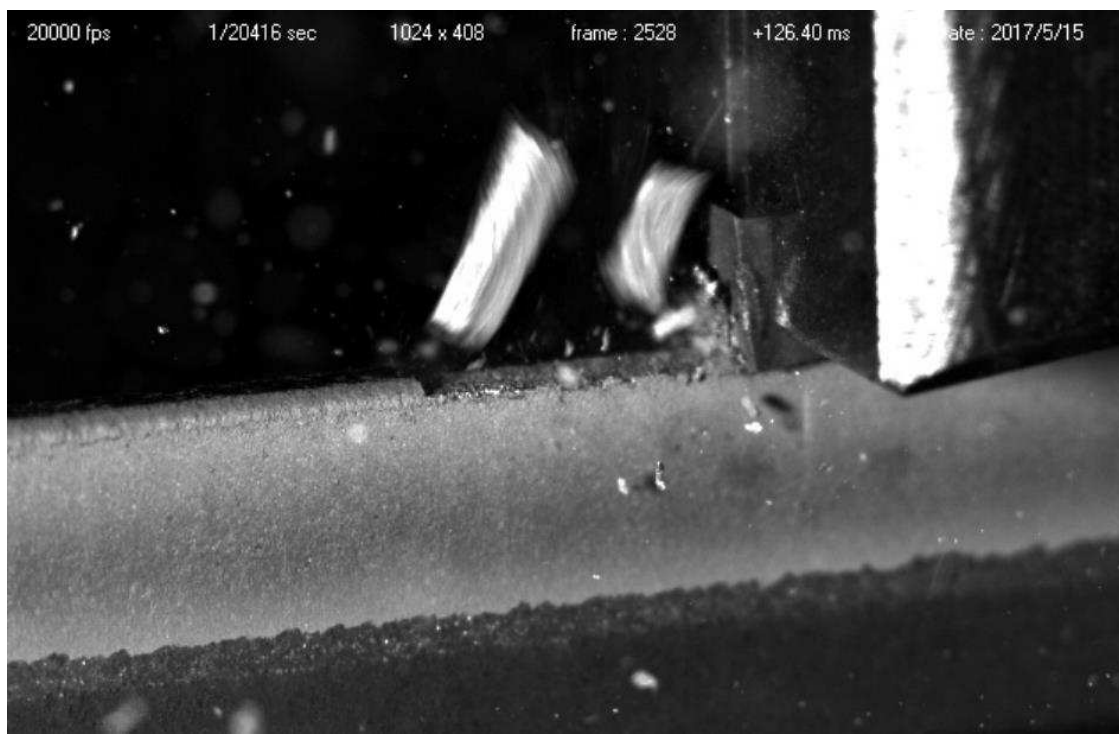
$a_p$ [mm]	0,2	0,3	0,4
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,502	0,678	0,612
	0,47	0,374	0,758
	0,48	0,415	0,815
	0,548	0,417	0,792
		0,445	0,652
		0,554	0,563
			0,502
			0,516

Tabulka 2 - Naměřené hodnoty drsností Ra [6]

$a_p$ [mm]	0,2	0,3	0,4
Rz [ $\mu\text{m}$ ]	3,347	5,071	4,138
	1,95	2,384	5,839
	2,651	1,912	5,556
	3,737	2,763	6,928
		3,104	4,429
		4,566	2,957
			4,186
			2,918

Tabulka 3 - Naměřené hodnoty drsností Rz [6]

Ze záběrů z vysokorychlostní kamery bylo vidět, že za určitých podmínek dochází k úplnému vytrhávání žárového nástřiku, viz obrázek 5. Dělo se tomu tak při odebrání třísky na rozhraní základního materiálu a žárového nástřiku. Úplné vylomení žárového nástřiku má zásadní vliv na jeho funkčnost a použití. [6]



Obrázek 5 - Vylamování žárového nástřiku Stellite 6 [6]

## 2.2 Slitiny na bázi kobaltu (Co) a chromu (Cr)

Jak již název napovídá, jedná se o slitiny, v nichž nejvíce zastoupenými prvky jsou kobalt (Co) a chrom (Cr). V této slitině se nachází mezi 45 – 55 % kobaltu (Co) a je označován jako základ. Druhým nejvíce zastoupeným prvkem je již zmiňovaný chrom (Cr), jehož množství se pohybuje v hodnotách 25 – 35%. Nezanedbatelné zastoupení v této slitině má i wolfram (W) a to od 5 – 25%. Dalším velmi důležitým prvkem je uhlík (C), který vytváří jednotlivé karbidy a je zde obsažen v rozmezí 0,1 – 1,5%. V malém množství se v těchto slitinách vyskytují i doprovodné prvky, kterými mohou být například molybden (Mo), nikl (Ni), niob (Nb), tantal (Ta), křemík (Si), mangan (Mn) a železo (Fe). Slitiny s takovým procentuálním zastoupením prvků lze nalézt také pod názvem Stellite. Podle uvedených hodnot je patrné, že stellite slitiny mohou mít velmi odlišné chemické složení a tím i výsledné vlastnosti. [7]

Slitiny na bázi kobaltu a chromu jsou navrženy tak, aby zaručovaly zvýšenou odolnost proti opotřebení a to především odolnost proti abrazi, adhezi a korozi i v případě zvýšených teplot. Další užitečnou vlastností využívající především chemický průmysl je odolnost proti různým druhům chemických látek. Z důvodu velmi nízké permeability jsou rovněž zcela nemagnetické. Stellite slitiny také mohou, ale nemusí být elektricky vodivé. [8]

Obsahy jednotlivých chemických prvků mají zásadní vliv na výsledné vlastnosti. Se zvyšujícím se obsahem kobaltu roste u této slitiny pevnost v ohybu a lomová houževnatost. Chrom a wolfram vytvářející karbidy s uhlíkem zajišťují požadovanou tvrdost a pevnost. Tvrdost se pohybuje v rozmezí 36 – 45 HRC a mez pevnosti v tahu je udávána v rozsahu 800 – 1200 MPa. Karbidy chromu navíc zvyšují odolnost proti korozi a oxidaci i za vyšších teplot. Bod tání je dán kombinací a obsahem jednotlivých prvků a pohybuje se v rozmezí 1200 – 1400 °C. [5],[9]

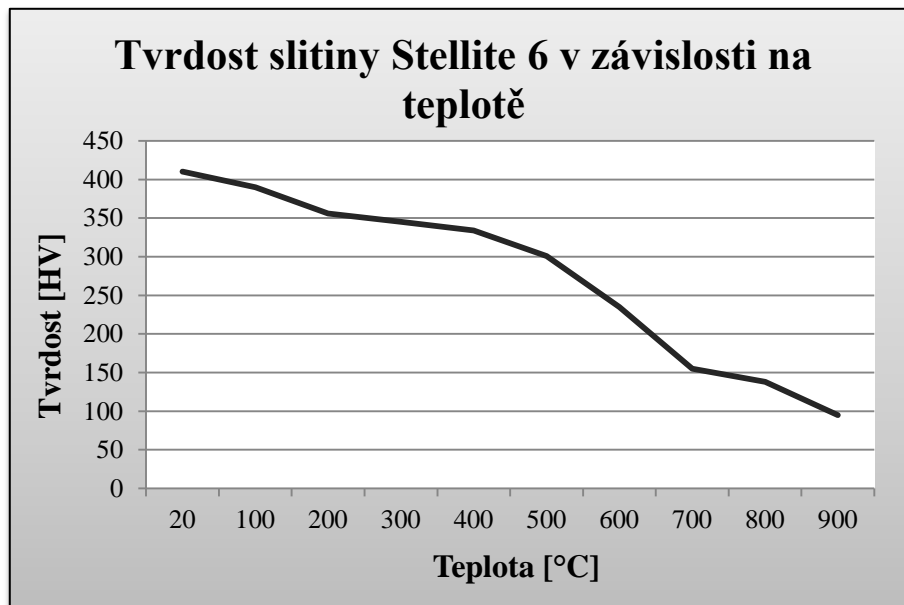
## 2.3 Stellite 6 a jeho obrobitelnost

V procesu nanášení žárových nástřiků se v současné době významně využívá slitina označena jako Stellite 6. Jelikož obsahuje 0,9 - 1,4 % uhlíku, řadí se mezi vysoce uhlíkovou slitinu stellite. Přesné chemické složení je popsáno v tabulce 4. Uvedené obsahy jednotlivých chemických prvků jsou dostupné z katalogů firem Deloro a Kennametal. [10]

Co	Cr	W	C	Ni	Fe	Si	Mo	Mn	ostatní
45 - 60 %	27 - 32 %	4 - 6 %	0,9 - 1,4 %	max. 3 %	max. 3 %	max. 1,5 %	max. 1 %	max. 1 %	max. 1 %

Tabulka 4 - Chemické složení slitiny Stellite 6 [10]

Svou popularitu má především díky rovnovážnému poměru mezi tvrdostí a houževnatostí. Obsahuje velké množství tvrdých karbidů chromu a wolframu. Karbidy přispívají k velmi dobré schopnosti odolávat mnoha druhům opotřebení a to i v případě zvýšených teplot. Stejně jako u jiných materiálů se se zvyšující teplotou klesá i celková tvrdost slitiny. Tato závislost je znázorněna v grafu 6, kdy při pokojové teplotě je hodnota tvrdosti 410 HV. Při nárůstu teploty si slitina stále ponechává patřičnou hodnotu tvrdosti 400-300 HV do 500 °C. Poté nastává razantní pokles tvrdosti, jak je možné vidět na grafu 6. [6]



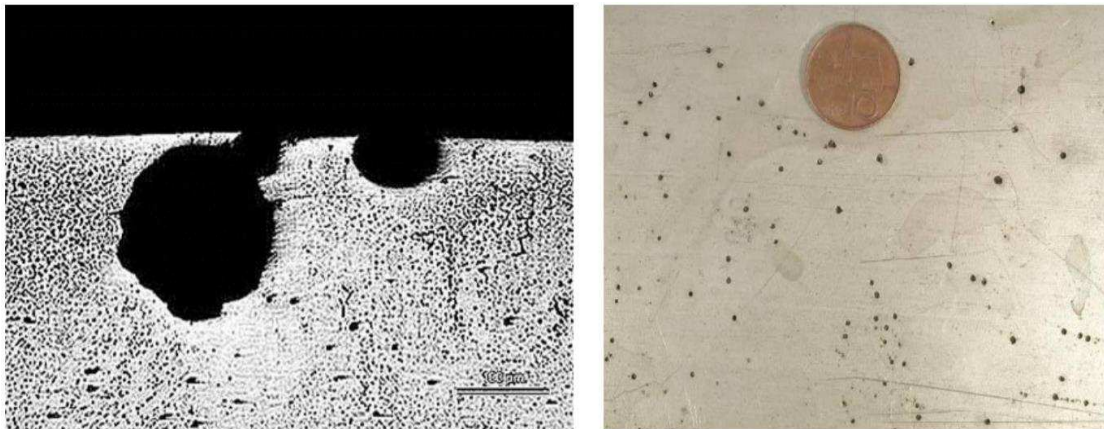
Graf 6 - Závislost tvrdosti Stellite 6 na teplotě [10]

Základní mechanické vlastnosti slitiny Stellite 6 při pokojové teplotě 20° jsou shrnuty v tabulce 5. Uvedené hodnoty jsou dostupné v katalogu Deloro Stellite. [10]

Mez pevnosti v tahu – Rm [MPa]	Mez pevnosti v kluzu – Re [MPa]	Tažnost [%]	Youngův modul pružnosti [GPa]	Tvrdość [HV]	Mikrotvrdość [HV <sub>0,3</sub> ]
850	700	<1	209	410	650-700

Tabulka 5 - Mechanické vlastnosti Slitiny Stellite 6 [10]

Podle dostupných zdrojů se obsah chromu pohybuje v rozmezí 27 – 32 %. Takto vysoký podíl chromu má příznivý vliv i na protikorozní vlastnosti této slitiny. V případě zeslabení pasivační vrstvy (např. z důvodu vměstků nebo okují) dochází ke vzniku makročlanků, které vedou k tvorbě různých bodů a prohlubní s poměrně úzkým hrdlem. Tento průběh je znám pod pojmem „bodová koroze“ a je typický u korozivzdorných ocelí. Z důvodu úzkého hrdla zůstává agresivní médium ve vytvořených prohlubních a koroze se tím dále rozšiřuje do základního materiálu. [12]



Obrázek 6 - Bodová koroze korozivzdorné oceli [12]

V průmyslu se slitina Stellite 6 využívá převážně ve formě žárového nástřiků s maximální tloušťkou do 500  $\mu\text{m}$ . Po nanesení je potřeba tento nástřik obrobit a snížit tak jeho povrchovou drsnost. Výsledná tloušťka po obrobení se pohybuje v rozmezí 50 – 300  $\mu\text{m}$ . Ve formě celistvých objemových materiálů se tato slitina prakticky nepoužívá, z důvodů vysoké ceny materiálu a složité výroby. [9]



Obrázek 7 - Aplikace žárového nástřiku na povrch válce [11]

Obrobitelnost lze chápat jako technologickou vlastnost materiálu obrobku určující náročnost jeho obrobení za určitých technologických podmínek. Chrom – kobaltové slitiny obecně patří mezi těžkoobrobitelné materiály, právě z důvodu velkého obsahu zmiňovaných karbidů. U slitiny Stellite 6 tomu nebude jinak. Karbidy chromu a wolframu jsou velmi tvrdé a způsobují intenzivní abrazi na řezném nástroji, čímž se velmi snižuje jeho trvanlivost. Obrobitelnost materiálu je závislá na mnoha faktorech. Jmenujme například chemické složení, fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného materiálu, řezné podmínky, geometrie a materiál řezného nástroje, pracovní prostředí atd. [13]

## 2.4 Princip vytváření žárových nástřiků

Princip vytváření žárových nástřiků spočívá v nanášení nového materiálu (povlaku) na vhodně připravený povrch součástí s cílem vytvořit souvislý povlak požadované tloušťky. Na obrázku číslo 8 jsou znázorněny jednotlivé kroky pro vytvoření žárového nástřiku. Nanášený materiál je obvykle ve formě prášku nebo drátu s přesným chemickým složením. Ten je přiveden do speciálního zařízení, kde dochází k natavení a urychlení částic vlivem tepelné energie. Takto připravený materiál je usměrněn pomocí trysky a po dopadu se vlivem adheze a kinetické energie ukotví na základní povrch součásti. [9],[15]



Obrázek 8 - Princip vytváření žárových nástřiků [14]

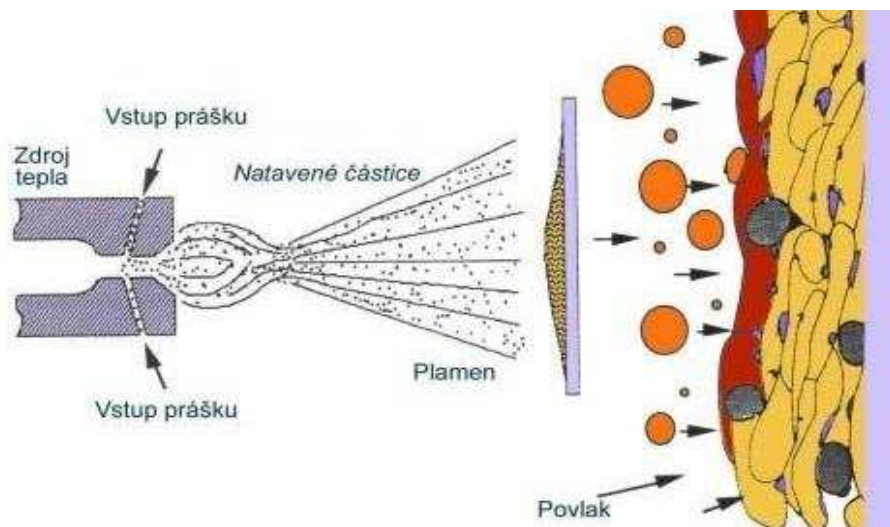
Po dopadu nastává rychlé tuhnutí povlaku, tím se vytváří typická lamelární (diskovitá) struktura požadovaných vlastností. Tímto se výrazně liší od ostatních technologií vytvářející povlaky. Na povrch totiž nedopadají jednotlivé atomy či ionty, ale přímo natavené nebo částečně natavené částice přídavného materiálu. Proto je lamelární struktura typická pro žárové nástřiky a je částečně ovlivněna použitou metodou nanášení a procesními parametry. [14]

### 2.4.1 Procesní parametry

Procesní parametry mají zásadní vliv na finální kvalitu žárového nástřiku. Parametry by měli být optimálně nastaveny pro jednotlivé typy metod a podle složení použitého přídavného materiálu. Nejdůležitější parametry se týkají velikosti a délce trvání dodávané tepelné energie, rychlosti dopadu natavených částic a jejich sklon k základnímu materiálu. Detailněji tyto parametry rozdělujeme do následujících skupin. [16]

- ▶ **Konstrukce zařízení:** zdroj tepelné energie, způsob přívodu materiálu (prášek, drát), tavná teplota, typ chlazení, tvar trysky
- ▶ **Nosný plyn:** množství, rychlost, složení, teplota
- ▶ **Přidavny materiál:** forma přídavného materiálu (prášek, drát), způsob přívodu, chemické složení, tvar a velikost, ostatní vlastnosti (bod tání, tepelná vodivost, hustota), elektrický odpor a elektrická vodivost
- ▶ **Aplikační parametry:** vzdálenost trysky od povrchu součásti, doba setrvání částic v tavné teplotě, rychlost a kinetická energie natavených částic při dopadu, úhel a dráha letu dopadajících částic, velikost posuvu aplikačního zařízení, ústí a dopadová teplota částic

- ▶ **Základní materiál:** teplota, chemické složení, drsnost povrchu, tvar a velikost
- ▶ **Aplikační prostředí:** ochranná atmosféra (s, bez), velikost tlaku (atmosférický, snížený, vakuum) [16]



Obrázek 9 - Schéma struktury žárového nástřiku [17]

Obecně lze říct, že největší vliv na kvalitu konečného povlaku má rychlost a teplota natavených částic. Se zvyšující se rychlostí roste jejich kinetická energie, což má za následek vyšší plastickou deformaci částic při dopadu na základní materiál. Po dopadu je tak nástřik lépe ukotven a má i vyšší hustotu. Na druhou stranu, vyšší rychlost může zapříčinit nižší míru natavení částic. To vede k horší kvalitě nástřiku, povlak má menší hustotu a je tak porézní. Kladem takto vzniklých povlaků je menší míra oxidace. [16]

## 2.5 Rozdělení žárových nástřiků

Základní rozdělení metod nanášení žárových nástřiků je podle použitého zdroje tepelné energie. Jednotlivé metody se liší především v použité tavné teplotě. Metody se dále odlišují podle formy přídavného materiálu a také jestli je potřeba natavené částice unášet plynem či nikoliv. [14]

### 1) Tepelný zdroj ve formě elektrické energie

- Nástřik elektrickým obloukem
- Plazmový nástřik

### 2) Bez tepelného zdroje

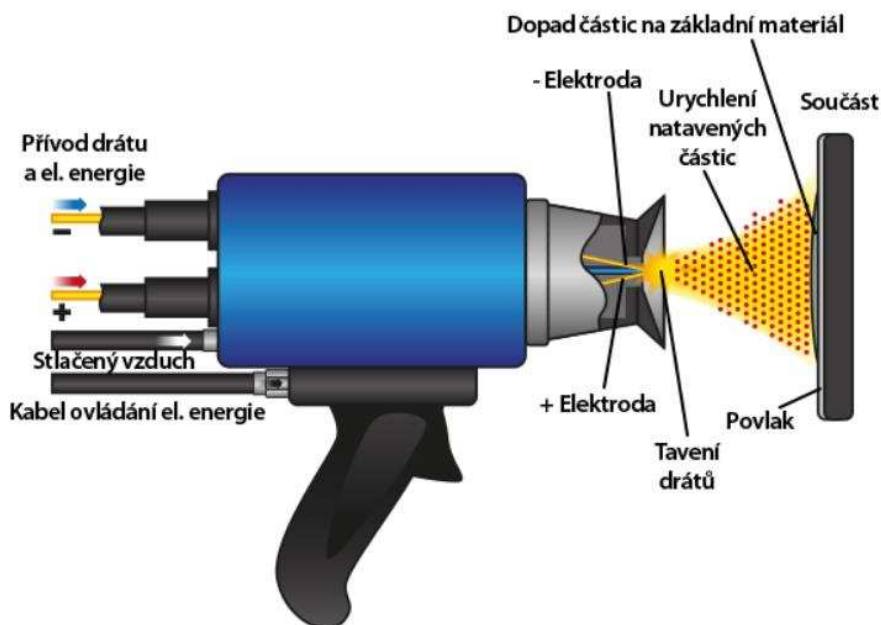
- Nástřik za studena

### 3) Tepelný zdroj ve formě hoření směsi paliva s kyslíkem

- Nástřik plamenem
- Detonační nástřik
- Vysokorychlostní nástřik plamenem (HVOF)

### 2.5.1 Nástřik elektrickým obloukem

Zdroj tepelné energie je elektrický oblouk. Přídavný materiál je ve formě dvou vodivých drátů, které mohou být stejného nebo odlišného složení. Tyto dráty jsou přivedeny do výstupní trysky, kde se po jejich vzájemném přiblížení zapálí elektrický oblouk. Teplo vyvolané elektrickým obloukem kontinuálně natavuje přídavný materiál a vzniklá tavenina je rozptylována stlačeným vzduchem. Proud natavených částic je unášen a dopadá na povrch základního materiálu v rychlosti 100 až 150 m/s. Tavicí teplota se pohybuje v rozmezí 4000 – 8000 °C. Z důvodu použití studeného unášivého plynu je však teplota natavených částic nižší, a to kolem 3600 – 4000 °C. [7],[16]



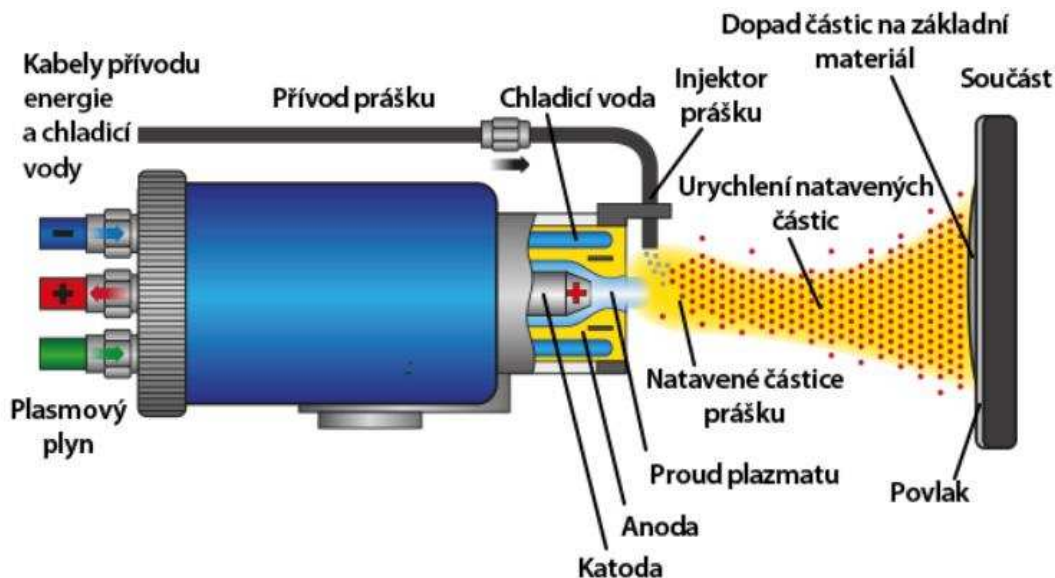
Obrázek 10 - Schéma metody nástřiku elektrickým obloukem [14]

Výhodou této metody je především její jednoduchost spojená s nízkými pořizovacími a provozními náklady. Tepelné ovlivnění povlakované součásti je u nástřiku elektrickým obloukem podstatně menší, protože unášení natavených částic se děje pomocí studeného proudu vzduchu. Tím je možné nanášet žárový nástřik na takové typy substrátu, jakými jsou například polymery, dřevo nebo sklo. Dalším kladem je s porovnáním s ostatními metodami poměrně vysoký výkon. To představuje až 80 kg naneseného nástřiku za hodinu. [7],[16]

Hlavní nevýhoda nástřiků elektrickým obloukem spočívá v náročnosti kladené na přídavný materiál. Ten musí být elektricky vodivý a zároveň i dobře tvárný. Nanášené částice jsou proti ostatním metodám silnější a jejich velikost je nesouměrná. Výsledný povlak je proto více porézni a vyznačuje se i horší drsností. Kvalita povlaku je ovlivněna hlavně stabilitou elektrického oblouku, který hoří mezi přídavnými dráty. Proto je důležité zajistit stabilní elektrický zdroj a dodržovat stejnou rychlost podávání drátů. [7],[16]

## 2.5.2 Plazmový nástřik

Plazmový nástřik využívá zdroj tepelné energie opět z elektrického oblouku, který hoří mezi katodou a anodou. Katoda je vyrobena z wolframu a vede kolem ní chladicí okruh. Měděná anoda, která má tvar válce, slouží jako tryska plazmového hořáku. Elektrický oblouk hoří v plazmovém plynu, jenž obsahuje inertní plyn (obvykle argon) s menším procentem doprovodného plynu, který zvyšuje energii plazmy (např. vodík, dusík nebo hélium). Tím je docíleno toho, že plazma vystupující z hořáku může dosahovat až 20 000 °C. Do vytvořené plazmy je nosným plynem přiveden prášek nanášeného materiálu. Princip vytváření žárového nástřiku pomocí plazmy je na obrázku 11. [9],[16]



Obrázek 11 - Schéma metody plazmového nástřiku [14]

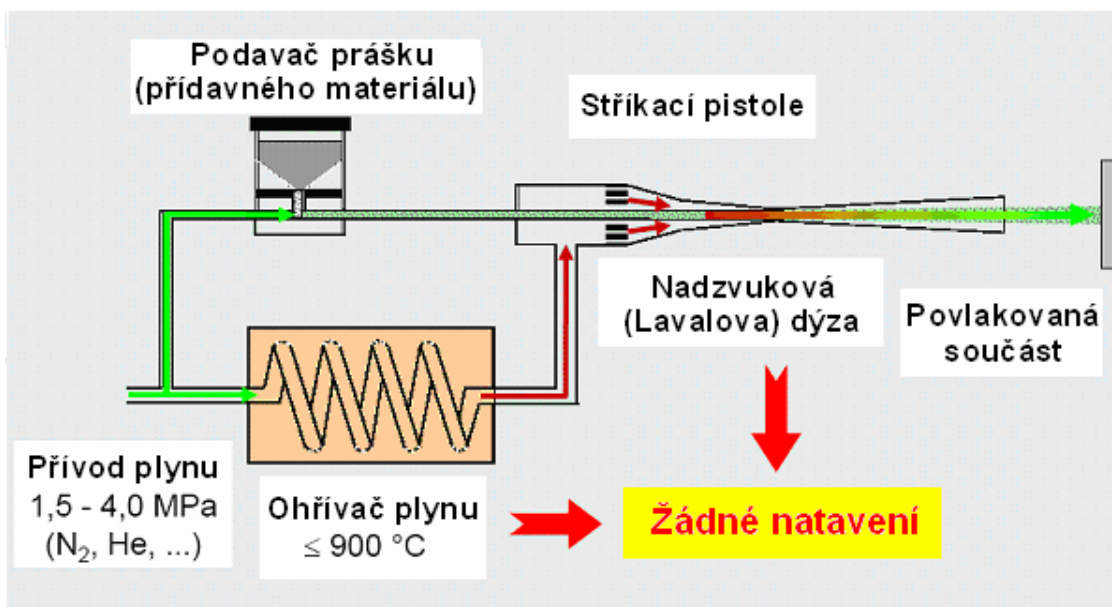
Mezi výhody plazmového nástřiku rozhodně patří vysoká tavící teplota. Jako nanášený materiál lze použít široké spektrum materiálů a to i materiály s vysokou teplotou tání. Použitím uzavřené komory se sníženým tlakem lze docílit vysoké čistoty povlaku s vysokou přilnavostí a hustotou (až 99%). Obsah oxidů v povlaku je díky uzavřené komoře téměř nulový. Kombinace plazmového nástřiku a uzavřené komory se nazývá „Plazmatický nástřik ve vakuu“. [9],[16]

Vysoká teplota má na druhou stranu i své nevýhody, protože může způsobit fázové změny jak v nanášeném, tak i v základním materiálu. V některých případech může dokonce dojít až k úplnému vyhoření některých prvků v přídavném materiálu. V porovnání s nástřikem elektrickým obloukem vyžaduje plazmový nástřik velmi složité technologické zařízení a speciální pracoviště, protože ultrafialové záření a vyšší míra hlučnosti působí negativně na lidský organismus. Plazmový nástřik se vzhledem k většímu množství technologických parametrů může lišit ve výsledné porezitě a přilnavosti. [9],[16]



### 2.5.3 Nástřik za studena

Nástřik za studena neboli nástřik studeným plynem je metoda specifická tím, že při ní nedochází k tavení částic nanášeného materiálu. Částice jsou unášeny aplikačním plynem (dusík, hélium), který je ohříván na maximálních 900 °C. Ukotvení povlaku na základní povrch součásti dochází pouze kinetickou energií unášených částic. Přídavný materiál je ve formě prášku přiveden do stříkací pistole, kde je unášen hnacím plynem do výstupní trysky ve tvaru Lavalovy dýzy. Pomocí Lavalovy dýzy se částice pohybují supersonickou rychlostí mezi 900 – 1200 m/s což je mnohonásobně vyšší než rychlost zvuku. Jako přídavný materiál se využívají spíše měkké kovy jako např. hliník, měď nebo jejich slitiny. V omezené míře se mohou použít i tvrdší a křehké kovy jako je titan nebo keramika, ale pouze v kombinaci s měkkým materiálem, který bude sloužit jako pojivo. [16],[18]



Obrázek 12 - Schéma metody nástřiku za studena [18]

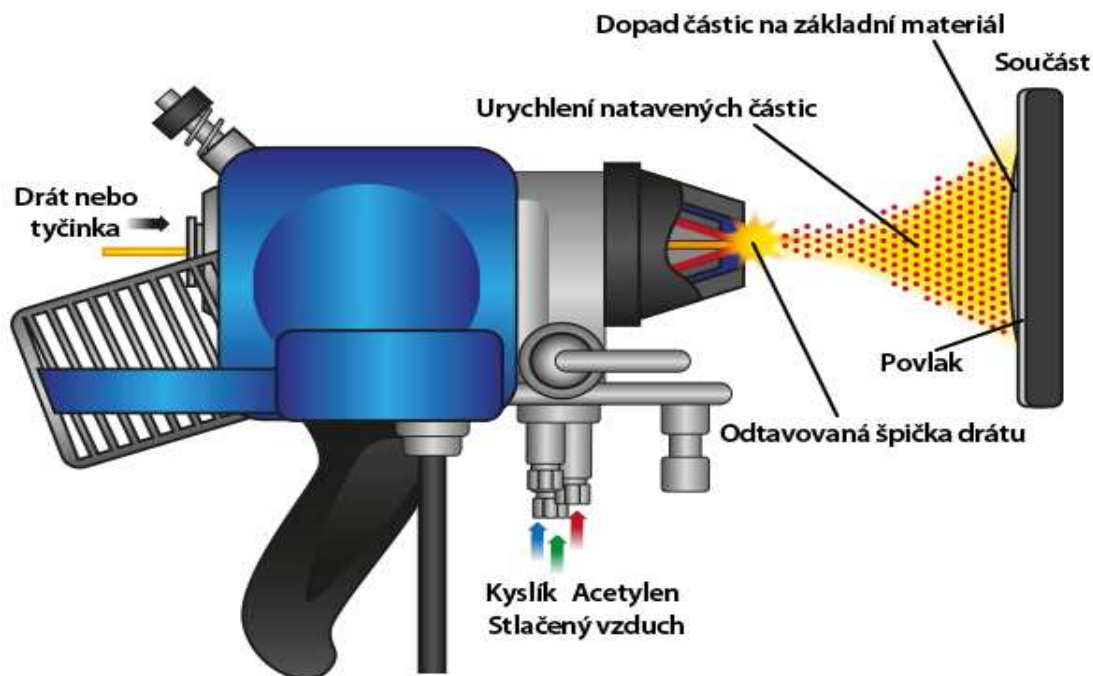
Největší předností této metody je nízká teplota částic a tím minimální tepelné ovlivnění základního a nanášeného materiálu. Menší tepelné ovlivnění také snižuje vnitřní pnutí v přídavném materiálu, které vzniká při jeho chladnutí. Snížené jsou i nároky na krytování součástí. Další výhodou je úspora času, protože po aplikaci nástřiku není potřeba nechávat součást chladnout jako v případě ostatních metod. Součást tak může být okamžitě použita na další zpracování. Poslední zde uvedenou výhodou je minimální vznik oxidů ve struktuře. [16]

Naopak nevýhodou z ekonomického hlediska je z důvodu velkých průtoků velmi vysoká spotřeba aplikačního plynu. Omezující je též výběr přídavného materiálu, protože se využívají spíše měkké kovy jako hliník a měď. [16],[18]

Nástřik studeným plynem patří mezi jednu z nejmodernějších metod, která je stále ve fázi vývoje. Proto se nám některé informace nepovedlo zjistit. Například informace o přilnavosti a pórovitosti povlaku by ukázali další výhody popř. nevýhody této metody. [16],[18]

## 2.5.4 Nástřik plamenem

Tepelná energie je v případě nástřiku plamenem získávána z hoření směsi kyslíku a paliva. Palivem bývá nejčastěji acetylen, ale v některých případech se používá i propan, propylen nebo vodík. Pro zvýšení kinetické energie natavených částic se navíc přivádí stlačený vzduch pod tlakem okolo 0,6 MPa. Konstrukci zařízení ovlivňuje druh nanášeného materiálu, který může být ve formě prášku, drátu nebo speciálních tyčinek. Přídavný materiál je přiveden středem zařízení přímo do plamene, kde dochází k natavení a urychlení jednotlivých částic. Na obrázku 13 je znázorněna konstrukce při použití přídavného materiálu ve formě drátu. [7],[9]



Obrázek 13 - Schéma metody nástřiku plamenem [14]

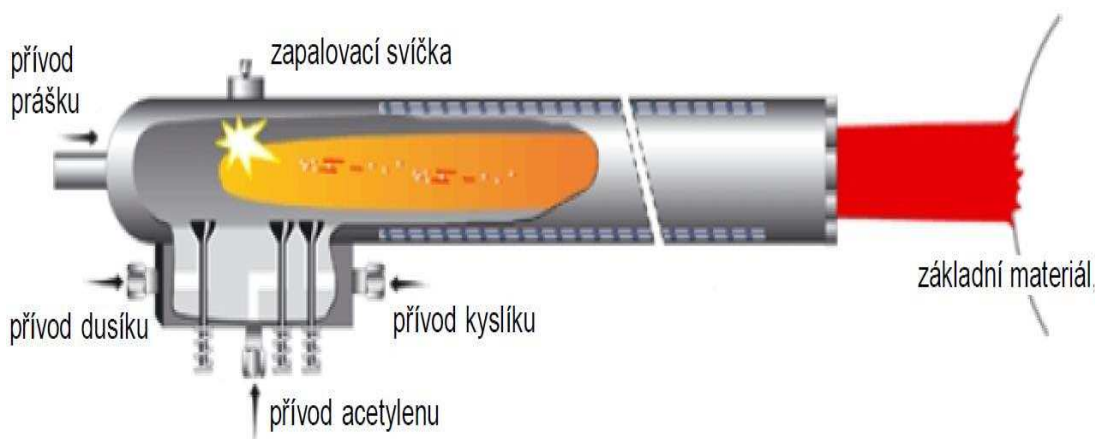
Během procesu hoření vzniká teplota v rozmezí 2700 – 3200 °C. Vzhledem k nižší teplotě (v porovnání s ostatními metodami) je nutné jako přídavný materiál použít pouze polymery nebo kovy s nízkou teplotou tání (hliník, zinek, bronz). Nižší je i rychlost natavených částic, která je v rozmezí 50 – 100 m/s. [7],[9]

Vzhledem k tomu, že se metoda vytváření povlaku za pomoci plamene řadí mezi nejstarší metody žárových nástřiků, převažují u ní v současné době spíše nevýhody než výhody. Mezi hlavní klady patří pořizovací a provozní náklady. Své využití má proto u součástí s menšími nároky na vlastnosti povlaku. [7],[9]

Proti ostatním metodám však dosahuje nástřik plamenem zdatně menších rychlostí a tavicích teplot. Z tohoto důvodu je pórovitost a přilnavost povlaku horší než u jiných metod. Vlivem hoření směsi je v nanášeném povlaku vyšší výskyt oxidů. Pro přídavný materiál Stellite 6 je tato metoda nevhodná, právě z důvodu nízké tavicí teploty. Pro natavení částic wolframu je totiž zapotřebí minimálně 3422 °C. [7],[9]

### 2.5.5 Detonační nástřík

Při detonačním nástříku je tepelná energie získávána z výbuchu (detonace) směsi plynů, která je přivedena do spalovací komory. Směs plynů je nejčastěji tvořena acetylenem a kyslíkem v určitém poměru. Jednotlivé plyny jsou odděleně přivedeny do spalovací komory, kde dochází k jejich promíchání a stlačení. Ve stejné chvíli je do spalovací komory přiveden nanášený materiál ve formě prášku. Následuje zažehnutí směsi plynů spolu s práškem pomocí zápalné svíčky a nastává natavení a urychlení částic prášku. Teplota vytvořeného plamene je v rozmezí 4000 – 6000 °C a rychlost částic je okolo 1000 m/s. Detonační nástřík vychází z principu metody nástříku plamenem. Proti této metodě však dosahuje vyšších teplot a rychlostí plamene. Ve struktuře se rovněž vyskytuje daleko méně oxidických vměstků. [16]

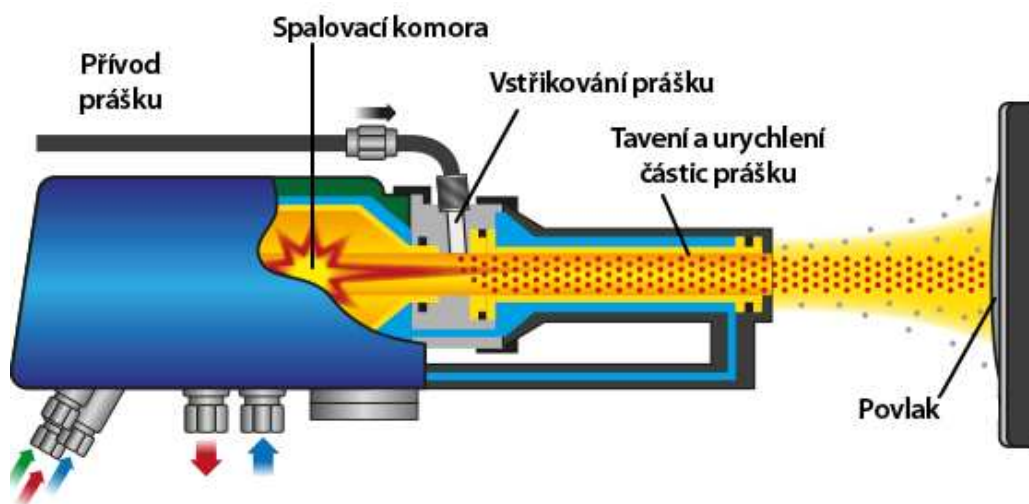


Obrázek 14 - Schéma detonačního nástříku [16]

Hlavním rozdílem proti metodě nástříku plamenem je to, že proces neprobíhá kontinuálně. Po každé detonaci je spalovací komora vypláchnuta proudem dusíku a tento postup se cyklicky opakuje více jak 100krát za minutu. Detonační metoda se řadí mezi jednodušší a ekonomické metody nanášení žárových nástříků. I přesto má výsledný povlak dobré vlastnosti, podstatně lepší než u nástříku plamenem. Nanášet lze většinu dostupných materiálů a slitin. Povlaky vytvořené detonační metodou mají po metodě HVOF nejvyšší přilnavost ze všech popisovaných metod a to až 82 MPa. [16]

### 2.5.6 Vysokorychlostní nástřik plamenem (HVOF)

Vysokorychlostní nástřik plamenem je označován jako HVOF (**H**igh **V**elocity **O**xxygen **F**uel). Jedná se o nejmodernější metodu v oblasti žárových nástřiků. Je založena na podobném principu jako metoda detonační, s tím rozdílem, že nástřik je zde nanášen kontinuálně. Spalovací komora je nepřetržitě plněna směsí paliva a kyslíku v určitém poměru. Tento poměr má zásadní vliv na tavnou teplotu plamene, která se pohybuje v rozmezí 2800 – 5000 °C. Jako palivo se nejčastěji používá kerosin, v menší míře se využívá propylen, acetylen nebo vodík. Přivedená směs je ve spalovací komoře promíchána a zažehnuta pomocí svíčky. Přídavný materiál ve formě prášku je unášen nosným plynem (nejčastěji dusík) do vzniklého plamene, kde dochází k jeho natavení. Ve speciální trysce (konvergentně divergentní) pak dochází k výraznému urychlení natavených částic až na supersonické hodnoty (přes 1000 m/s). Pro zajištění stabilních podmínek hoření je sledován tlak v komoře a celá konstrukce hořáku je chlazena vodou. [7],[9],[11]



Obrázek 15 - Schéma HVOF metody [14]

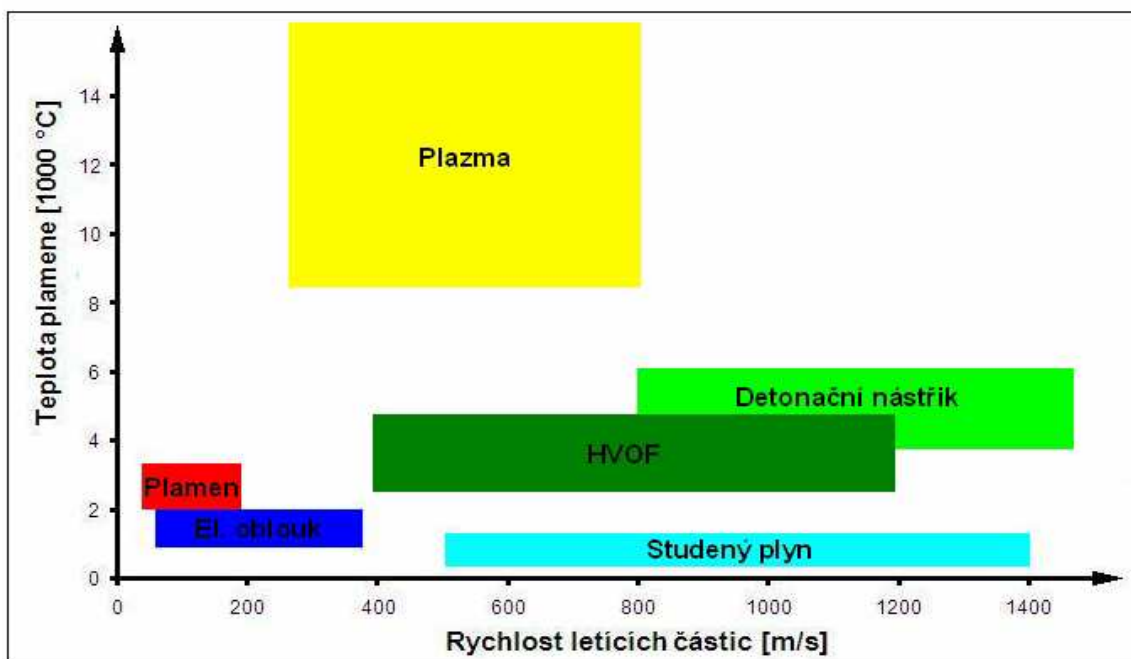
Vlivem vysoké rychlosti tak získáváme velmi kvalitní povlaky s doposud nejvyšší možnou adhezí až 90 MPa. Žárový nástřik má také velmi nízký obsah oxidů a pórovitost, což v určitých případech vyvolává dokonce tlakové napětí v povlaku. To má příznivý vliv na odolnost proti vzniku a šíření trhlin. Kvůli nepřilíš vysoké tavné teplotě je metoda HVOF určena spíše pro materiály s nízkou až střední teplotou tání. Nejčastěji používané materiály jsou na bázi karbidu wolframu, chromu, kobaltu a niklu. Díky nižší tavné teplotě nedochází k fázovým přeměnám a rozpadu jednotlivých karbidů wolframu (WC), tím jsou zachovány původní vlastnosti přídavného materiálu (především tvrdost). Právě z těchto důvodů jen metoda HVOF značně využíváná u námi testovaného materiálu Stellite 6. [7],[9],[11]

Naopak menší využití má metoda vysokorychlostního nástřiku u materiálů na keramické bázi, kde nedochází k úplnému natavení keramických částic. Důsledkem toho má nanesený povlak vyšší pórovitost, menší adhezi a horší rozprostření na základním materiálu. Další nevýhodou je složitost procesu, při kterém rovněž vzniká nepříjemný hluk přesahující 100 dB. [7],[9],[11]

### 2.5.7 Vzájemné porovnání metod žárových nástřiků

Na závěr je třeba říci, že každá metoda nanášení žárových nástřiků má své výhody a nevýhody. Pro vybrání nejvhodnější varianty je potřeba zvážit mnoho faktorů jako například výslednou cenu, časovou náročnost, kvalitu povlaku, požadované vlastnosti, nanášený materiál, vybavenost pracoviště atd. Nicméně i při správně určené metodě nanášení dochází k výrazným odlišnostem vlivem procesních parametrů, kterým je potřeba věnovat také značnou pozornost. S neustálým vývojem a zdokonalováním procesu nanášení žárových nástřiků se stále objevují nové možnosti a metody, které zvyšují efektivitu a optimalizují celkový proces nanášení. Jednou z nejmladších metod, která je stále ve vývoji, je metoda nanášení povlaků za studena. Tato metoda má nepochybně velký potenciál, jelikož při ní nedochází téměř k žádnému tepelnému ovlivnění základního materiálu.

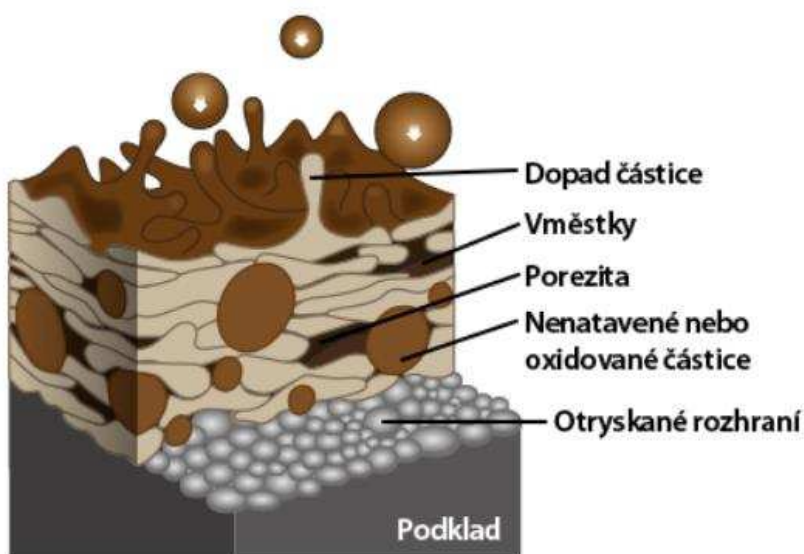
Pro konečnou představu je uveden graf 7 znázorňující jednotlivé metody v závislosti na dvou hlavních faktorech, kterými jsou tavící teplota a rychlost letících částic.



Graf 7 - Porovnání metod žárových nástřiků v závislosti na teplotě a rychlosti částic [19]

## 2.6 Struktura žárového nástřiku vyrobeného metodou HVOF

Struktura žárových nástřiků je z velké části ovlivněna použitou technologií nástřiku a jejími procesními parametry. Obecně lze říct, že typická struktura pro žárové nástřiky vytvořené jakoukoliv metodou je lamelární a tvoří jí natavené částice, kterým se obecně říká „splaty“. Plyne to ze samotného principu vytváření žárových nástřiků, při kterém jsou částice přídavného materiálu nataveny, urychleny a po dopadu zdeformovány do jednotlivých lamel diskovitěho tvaru. Mimo těchto „splatů“ se ve struktuře vyskytují nenatavené či částečně natavené částice, které ovlivňují pórovitost povlaku. Čistota přídavného materiálu pak ovlivňuje množství vměstků. V neposlední řadě povlak obsahuje částice, které v procesu nanášení nástřiku zoxidovali. Grafické schéma struktury žárového nástřiku s popisem je zobrazeno na obrázku 16. [6],[11]

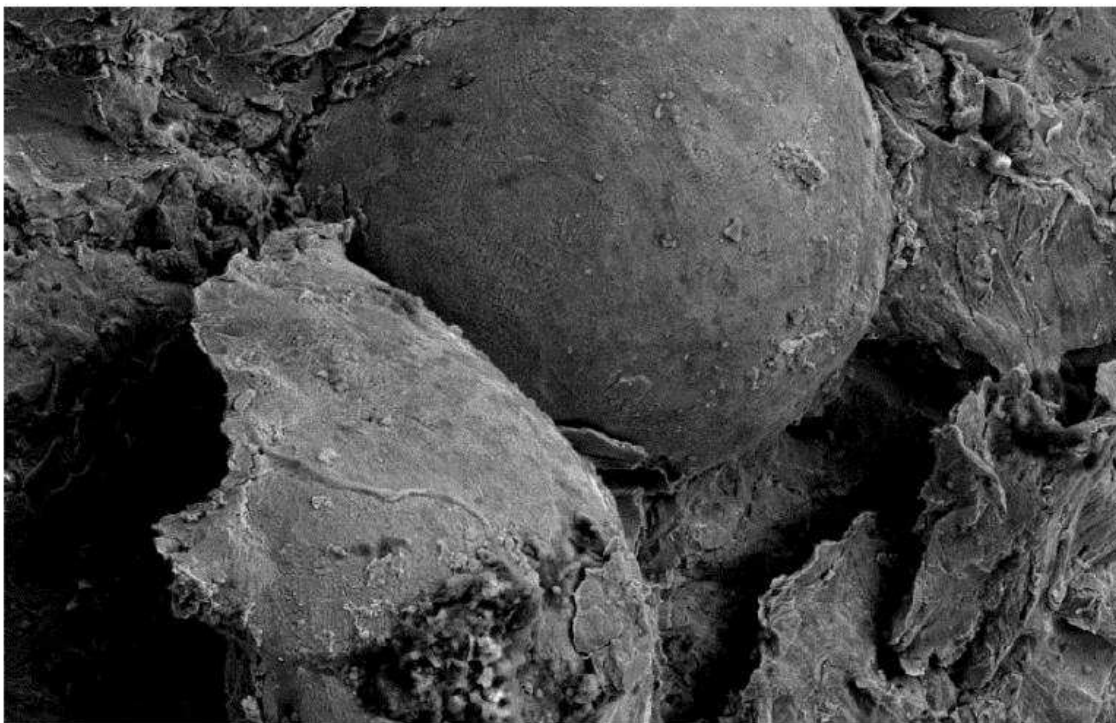


Obrázek 16 - Schéma struktury žárového nástřiku [14]

Tvar, rozložení a hustota částic je ovlivněna převážně tavicí teplotou a nástřikovou rychlostí. Při menší teplotě tavení nemusí dojít k úplnému natavení částic přídavného materiálu, ty se poté na základním materiálu hůře formují (rozstříkují) a výsledný tvar má spíše globulární charakter. To vede k menší hustotě povlaku a k horší přilnavosti, jednak k základnímu materiálu, tak i mezi jednotlivými částicemi vlivem menších stykových ploch. Následkem toho může docházet při následném obrábění k vytrhávání těchto částic, také se tím snižuje tvrdost povlaku a v některých případech to vede dokonce ke vzniku trhlin. S menší hustotou povlaku se zvyšuje množství pórů ve struktuře, které ovlivňují především kohezi a korozní odolnost. Korozní média pak prostupují těmito póry až k základnímu materiálu, kde nastává oxidace substrátu. Stejný problém může nastat i v případě, ve kterém je tavicí teplota dostačující, ale částice se pohybují na okrajích plamene, kde je teplota nižší než v centru žáru. Při správně zvolené teplotě a správném nastavení trajektorie letících částic záleží i na době, kterou částice přídavného materiálu v plamenu stráví. Je třeba myslet i na velikost částic přídavného materiálu, jelikož se zvyšující se velikostí roste potřebný čas a energie pro jejich úplné natavení. Snímek zachycující částečně natavenou částici je zobrazen na Obrázku 17. [11]

Při menších rychlostech nástřiku se dějí obdobné věci jako při nízké teplotě plamene. Natavené částice nemají dostatek kinetické energie, aby se po dopadu zdeformovaly. Výsledná struktura je opět spíše globulární s velkým množstvím pórů. I když pórovitost patří mezi hlavní vlastnosti udávající kvalitu povlaku, měřit ji je velmi obtížné. Jednou z možností jak pórovitost měřit je pomocí metalografického výbrusu. Při broušení a leštění metalografického výbrusu ale dochází k vytrhávání částic, které po sobě zanechávají důlky podobné pórům. To následně ovlivňuje přesnost hodnocení měření tím, že zhoršuje procentuální pórovitost v povlaku. [11]

Kromě hodnoty pórovitosti je dalším ukazatelem kvality povlaku množství a rozložení oxidů. Výskyt oxidů ve struktuře je do určité míry přínosný, neboť zvyšuje jeho tvrdost. V případě vyššího množství oxidů koncentrovaných blízko sebe však způsobuje křehkost a zhoršuje přilnavost povlaku. Jednou z možností, jak snížit množství oxidů je použití ochranné atmosféry při procesu stříkání. Zabráníme tak přístupu kyslíku, který reaguje na roztavené částice. Snížením teploty plamene lze obsah oxidů také snížit na úkor horšího natavení částic a tím zvýšení již zmiňované pórovitosti. Další možností, jak regulovat množství oxidů ve struktuře je snížení nástřikové vzdálenosti. Při menších vzdálenostech jsou pak částice vystaveny okolním vlivům kratší dobu. [11]



Obrázek 17 - Částečně natavená částice žárového nástřiku [7]

### 3 Oblast – OBRÁŽENÍ

Vzhledem k tomu, že se obrábění žárových nástřiků definovanou geometrií břitu řadí mezi nepříliš prozkoumanou problematiku, chceme zde navázat na získané informace z předešlých článků a prací. Katedra technologie obrábění se touto problematikou zabývá již několik let hlavně v oblasti soustružení. V roce 2017 proběhl první experiment i v oblasti obrázení, při kterém se zjistily prvotní informace ohledně chování nástroje v místě řezu, ze kterých je potřeba vycházet v následujících pokusech.

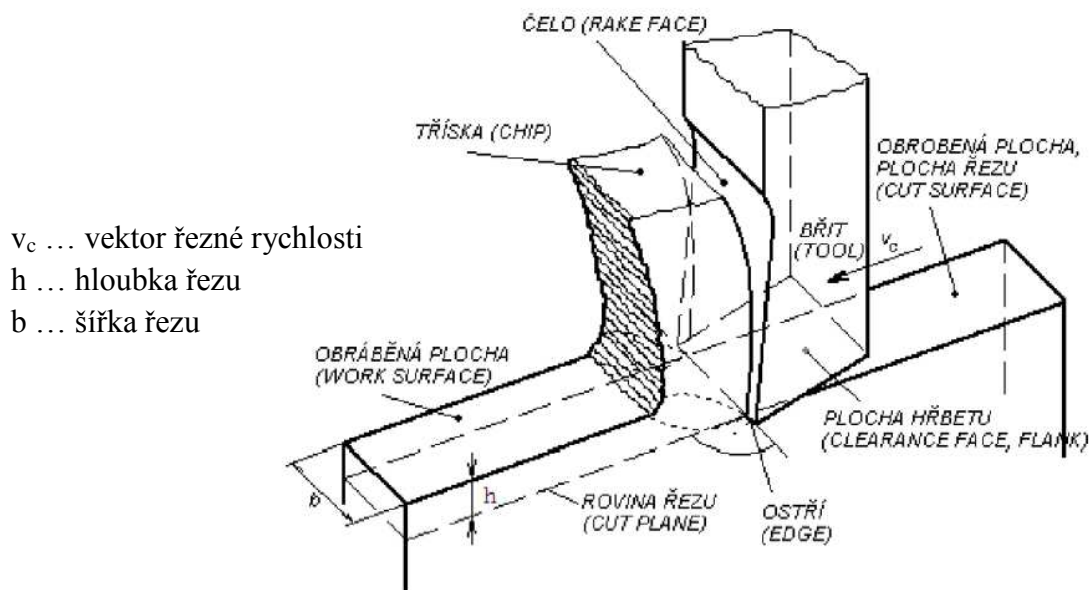
#### 3.1 Proces obrázení

Obrázení lze přirovnat k určitému druhu hoblování, s tím rozdílem, že v případě obrázení koná hlavní řezný pohyb nástroj, který je připevněn na pohybující se části obrážecího stroje tzv. smýkadlu. Tento pohyb lze charakterizovat jako přímočarý vratný pohyb, kde hlavní řezný pohyb je vykonáván při pohybu smýkadla dopředu. Při zpětném pohybu dochází k vyklopení řezného nástroje z důvodu ochrany před poškozením již obrobeneho povrchu. Navíc při zpětném pohybu smýkadla dochází také k pohybu vedlejšímu, který vykonává obrobek, přesněji řečeno pracovní stůl, na kterém je obrobek upnutý. Velikost obráběné plochy je závislá na velikosti pracovního stolu a rozsahu pohybu smýkadla. Z toho plyne, že obráběné plochy jsou proti hoblování mnohem menší. Obrázením lze obrábět vnitřní i vnější rovinné a tvarové plochy včetně kruhových ploch. Vzhledem k menší produktivitě ve srovnání se soustružením nebo frézováním se obrázení vyskytuje nejvíce v kusové či malosériové výrobě. Na druhou stranu má obrázení řadu výhod. Uvedme například nízkou cenu nástroje a náklady na jeho údržbu (cena může být proti frézování levnější až o 50%), dále jednoduchost upnutí obrobků na pracovní stůl a také možnost odebírat velkou třísku s poměrně dobrou kvalitou a rovinností povrchu. Při výrobě drážek ve velkosériové výrobě je obrázení nahrazováno více produktivní technologií s názvem protahování. Protahování je efektivní nejen z pohledu produktivity, ale i co se týče velikosti otvoru, protože je omezeno pouze velikostí protahovacího trnu. Protahování má ale svá omezení, a to v případě kdy je potřeba vyrobít vnitřní drážku ve slepém otvoru, kterou jinou technologií než obrázením vyrobít nelze. [21]

Při provádění experimentu je potřeba minimalizovat okolní vlivy a pokud možno co nejvíce zjednodušit proces obrábění, abychom získali co nejméně zkreslené výsledky. Z tohoto důvodu se plánovaný experiment provede ve zjednodušené variantě obrázení resp. v ortogonálním volném řezání, při kterém bude obráběna rovinná plocha zvoleného polotovaru.

Ortogonální volné řezání lze nejlépe charakterizovat tím, že tříska, která vzniká při kontaktu s řeznou hranou, je na bocích volná. Proto je nutné, aby šířka řezné hrany byla vždy větší než šířka obráběného polotovaru. Druhá podmínka se týká ostří respektive řezné hrany, která musí být kolmá na vektor řezné rychlosti. [13]



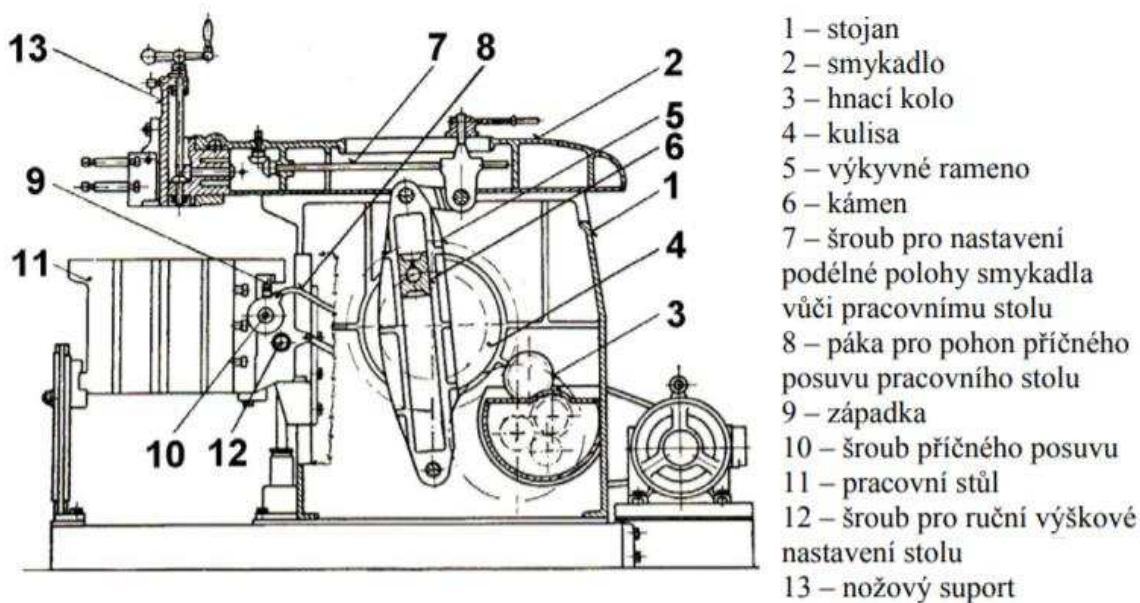


$v_c$  ... vektor řezné rychlosti  
 $h$  ... hloubka řezu  
 $b$  ... šířka řezu

Obrázek 18 - Schéma ortogonálního volného řezání [13]

### 3.2 Obrázcí stroj

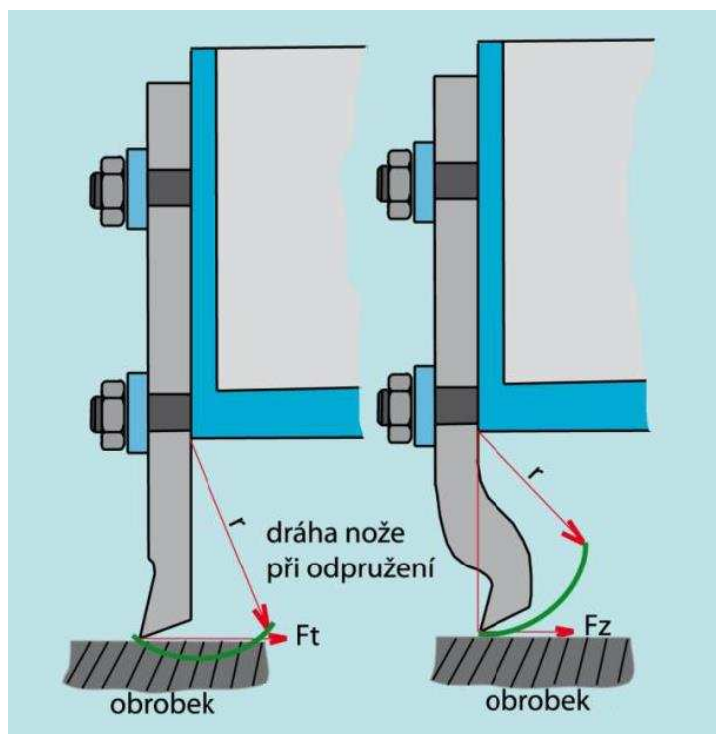
Podle konstrukce lze obrázcí stroj rozdělit na vertikální a horizontální. V halových laboratořích Katedry technologie obrábění jsou k dispozici obě varianty. Po zvážení obou variant s ohledem na plánovaný experiment jsme se rozhodli využít obrázcíku horizontální, protože dosahuje výrazně vyšších řezných rychlostí než obrázcíka vertikální. Jelikož se bude jednat o již zmiňované ortogonální volné řezání, nebude vykonávat pracovní stůl žádný posuvný pohyb. [21]



Obrázek 19 - Schéma horizontálního obrázcího stroje [21]

### 3.3 Varianty obrážecího nože

Nástroje používané při obrábění se nazývají obrážecí nože. Obrážecí nůž se svým tvarem podobá noži určenému na soustružení tzv. tangenciálnímu noži. Při obrábění je nůž vystavován v každém kmitu velkému rázu při prvotním kontaktu s obráběným materiálem. Tyto rázy mohou spolu s typicky vyšším vyložením obrážecího nože způsobovat intenzivní chvění a pružení řezného nástroje. Chvění a odpružení má zásadní vliv na stabilitu řezu, což ovlivňuje výslednou kvalitu a přesnost obrobeného povrchu. Jednou z možností řešení tohoto problému je zesílit upínací část pro zvýšení tuhosti obrážecího nože. Druhým způsobem řešení je vyhotovit nůž v prohnutém provedení, za účelem snížení míry odpružení a změnou trajektorie nástroje při odpružení. Obrážecí nůž je při tomto způsobu řešení konstruován tak, že špička nástroje je na úrovni základny upínací části viz obrázek 20. Nůž bez tohoto provedení může při odpružení zanechávat rýhy na obrobeném povrchu. Z uvedených důvodů jsme se rozhodli pro variantu nože v prohnutém provedení. [22],[21]



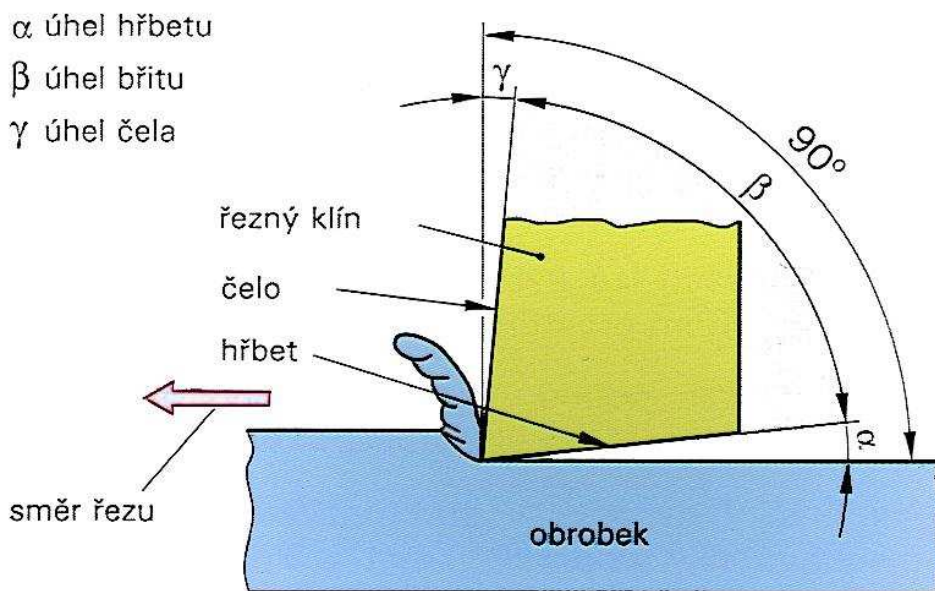
Obrázek 20 - Varianty obrážecího nože [22]

Obrážecí nože lze rozdělit podle typu použité řezné hrany na nože celistvé, pájené a s vyměnitelnou břitovou destičkou. Po zvážení všech variant i s ohledem na to, že je při experimentu plánováno měnit nastavení úhlu čela jsme došli k závěru, že nejjednodušší a zároveň nejspolehlivější variantou bude konstruovat obrážecí nůž s vyměnitelnou břitovou destičkou. Zároveň můžeme tímto způsobem vyloučit vliv opotřebení, jelikož je plánováno zhotovit každý řez neopotřeбенou řeznou hranou. Pro jednotlivé varianty nastavení úhlu čela je tedy potřeba vytvořit lůžko tak, aby destička po upevnění do těla nástroje splňovala předepsané úhly.

### 3.4 Geometrie nástroje – VBD

Důležité veličiny řezného nástroje a jeho chování v řezu jsou hodnoty jednotlivých úhlů břitu tj. úhel čela, hřbetu a ostří. Hodnoty těchto úhlů ovlivňují průběh vytváření třísky při obrábění, celkovou trvanlivost nástroje a výslednou integritu povrchu. Úhly na břitech také ovlivňují výkon řezných nástrojů a množství vynaložené práce k obrábění spolu s velikostí řezných sil a množství vytvořeného tepla v místě řezu. Veškeré úhly na řezném nástroji lze shrnout do tzv. řezných úhlů, které jsou všeobecně označeny pod pojmem geometrie břitu.

Pro správné porozumění procesu je nutná znalost těchto úhlů a jejich vlivu na námi zkoumaný proces. Nyní bude uvedeno základní rozdělení úhlů a jejich způsob chování při obrábění, které vyplývají z všeobecných teoretických poznatků. [13]



Obrázek 21 - Geometrie břitu obráběcího nože [23]

#### ➤ Úhel nastavení hlavního ostří - $\kappa_r$

Tento úhel působí na složky řezných sil v axiálním a radiálním směru. S narůstající hodnotou úhlu nastavení hlavního ostří se zvětšuje axiální složka řezné síly, zatímco s klesající hodnotou narůstá složka řezné síly v radiálním směru. Složka řezné síly v axiálním směru nemá zásadní vliv při procesu obrábění, neboť působí ve směru osy nástroje. Z toho vyplývá, že pokud chceme zabránit vzniku a šíření vibrací je výhodné volit velký úhel hlavního ostří. Opačný efekt má tento úhel v případě utváření třísky. Utváření třísky je jednodušší, jestliže je úhel nastavení menší, protože se zmenšujícím se úhlem se tloušťka třísky zmenšuje a narůstá tak její šířka. [24]

#### ➤ Úhel sklonu ostří - $\lambda$

Při kladném sklonu ostří, lze dosáhnout lepšího odvodu třísky z místa řezu a snížení řezného odporu. Naopak nabývá-li úhel sklonu ostří záporných hodnot, zvyšuje se pevnost nástroje a tím i jeho trvanlivost. [13],[20]

➤ **Úhel hřbetu -  $\alpha$**

Tento úhel lze označit jako úhel mezi tečnou obrobeného povrchu a hlavního hřbetu nože. Velikost úhlu ovlivňuje tření, které vzniká při kontaktu obrobené plochy s hřbetní plochou. Pokud se úhel hřbetu zmenšuje, narůstá tato styková plocha a tření je intenzivnější. Zvýšené tření může ovlivnit obrobený povrch nejen z hlediska drsnosti, ale i vznikem zbytkových napětí z důvodu hromadění tepla. Obvykle se tedy volí v rozmezí 3 – 20°, ideálně však 8 – 12°. Při vyšších hodnotách úhlu hřbetu klesá styková plocha a tření, proto je tato varianta vhodná při obrábění za vyšších řezných rychlostí s menší hloubkou řezu. [13],[20]

➤ **Úhel břitu –  $\beta$**

Úhel břitu je úhel, který svírá čelní plocha s hlavním hřbetem nože. Jeho velikost zásadním způsobem ovlivňuje řezný odpor. Obecně lze říct, že čím je úhel břitu menší, tím snáze proniká břit do obráběného materiálu. V opačném případě, tj. s větším úhlem břitu sice vzrůstá řezný odpor, ale břit je díky své tloušťce pevnější, proto není tak náchylný na otupení nebo zlomení jako v předešlém případě. Jeho velikost se obvykle volí v závislosti na použitém materiálu nástroje, materiálu obrobku a řezných podmínkách v rozmezí 45° – 90°. Dopočet ostatních úhlů při zvoleném úhlu břitu vychází ze vzorce:  $\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$  [13],[20]

➤ **Úhel čela –  $\gamma$**

Úhel čela se nachází mezi plochou čela a rovinou, která je kolmá na obráběný povrch a prochází hlavním ostřím nože. Velikost tohoto úhlu velmi ovlivňuje způsob tvoření třísky a řezný odpor, který klade materiál proti vniknutí řezného klínu. Pokud je úhel čela velký, břit snadněji vniká do obráběného materiálu a lépe po něm i odchází tříska z místa řezu. Při zachování konstantního úhlu hřbetu nám s rostoucím úhlem čela, klesá úhel břitu, což má za následek snížení tuhosti a pevnosti nástroje. Z tohoto důvodu se volí velký úhel čela především při obrábění měkkých a málo pevných materiálů. Při obrábění pevných a tvrdých materiálu bývá úhel čela zpravidla několik stupňů, popřípadě je nulový. Negativní úhel čela se obvykle používá pro nástroje, které jsou uzpůsobeny na obrábění těžkoobrobitelných kovů nebo slitin.[13],[20]

➤ **Úhel řezu –  $\delta$**

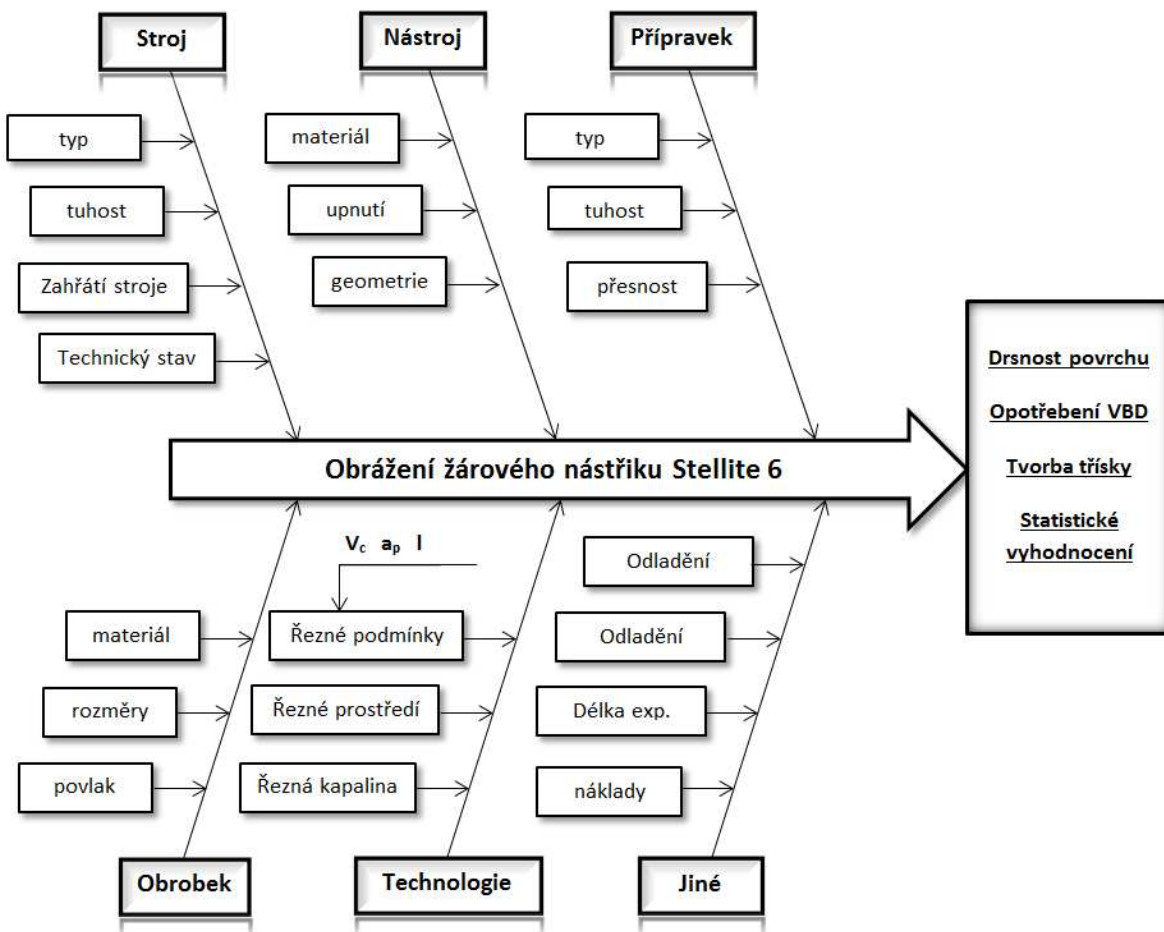
Úhel řezu se definuje jako součet úhlu hřbetu a úhlu břitu. Vyjadřuje se tedy vzorcem  $\delta = \alpha + \beta$ . Z toho plyne, že tento úhel svírá plocha obráběného povrchu s plochou čela nástroje.[13],[20]

## 4 Praktická část

Hlavním cílem této diplomové práce je docílit stejné nebo lepší kvality povrchu žárového nástřiku Stellite 6, který je obráběn definovanou geometrií břitu při porovnání s technologií broušení. Tento experiment a zjištěné výsledky rozhodnou o dalším pokračování řešení problematiky obrábění žárových nástřiků na Katedře technologie obrábění. V případě pozitivních výsledků je možné do budoucna uvažovat o obrábění složitějších součástí i se složkou posuvové rychlosti, která se v tomto experimentu nevyskytuje.

### 4.1 Plán experimentu

Pro vytvoření plánu experimentu je zásadní znát samotné faktory, které vstupují do procesu a ovlivňují kvalitu obrobeného povrchu. K souhrnnému hodnocení ovlivňujících faktorů byl vytvořen diagram příčin a následků známý také pod názvem Işikawův diagram. Diagram se skládá z řešeného problému a z faktorů, které do procesu vstupují. Šipka směřuje ke způsobům hodnocení, které budou provedeny po realizaci experimentu. Následně je třeba z vybraných faktorů určit, které lze a nelze měnit. Faktory, které nelze měnit nazveme obecně jako konstanty a jsou to například tuhost a přesnost stroje. Pro dosažení co nejlépejších výsledků je třeba zohlednit pokud možno co nejvíce těchto faktorů. Problém nastává při následném hodnocení, protože se při velkém počtu zohledněných faktorů výrazně komplikuje způsob vyhodnocení.



Obrázek 22 - Diagram příčin a následků

## 4.2 Obráběcí stroj

Jak již bylo v předchozí kapitole uvedeno, pro tento experiment bude využita horizontální obrázečka Strigon s označením GH560/U, která se nachází v halových laboratořích KTO. Parametry stroje jsou uvedeny v tabulce 6 a samotný vzhled stroje je na obrázku číslo 23.

Parametry stroje	
Maximální obráběcí délka	560 mm
Nastavitelná délka zdvihu	50 - 560 mm
Obráběcí šířka	630 mm
Svislé vyložení upínacího stolu	350 mm
Maximální pracovní výška	850 mm
Rozměry pracovního stolu	560 x 400 mm
Počet rychlostí	8
Počet kmitů za minutu	12 - 140
Příčný posuv stolu	0 - 2 mm/kmit
Výkon motoru	2,8 KW
Otáčky motoru	1420 / min.
Rozměry stroje	2098 x 1178 x 1590 mm
Hmotnost stroje	1600 kg



Tabulka 6 - Parametry obrázečky Strigon GH560/U [26]

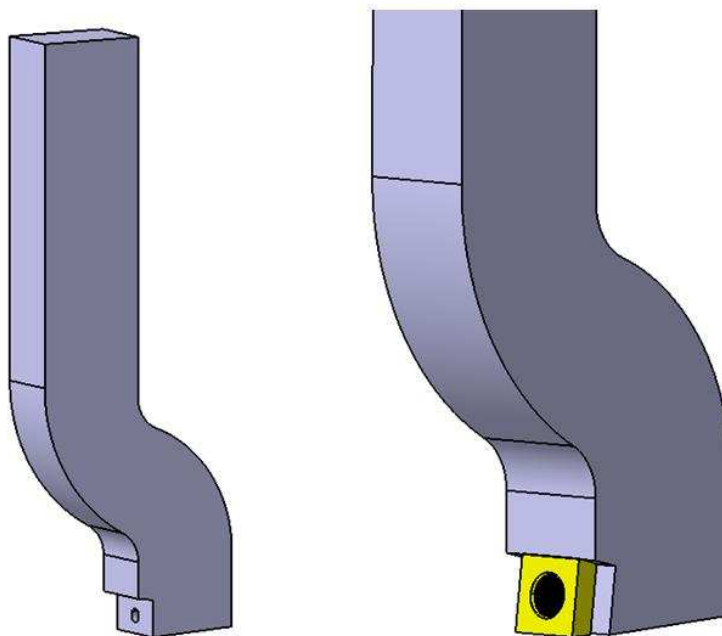
Obrázek 23 - Obráběcí stroj Strigon GH560/U [26]

## 4.3 Řezný nástroj

Řezný nástroj se svým tvarem podobá běžnému obráběcímu noži v ohnutém provedení. Esovitý tvar byl zvolen s ohledem na průběh odpružení popisované v kapitole 3.3. Jako materiál pro vytvoření nástroje byla zvolena ocel s označením 42CrMo4 s pevností 1000 MPa. Tato chrom-molybdenová ocel se běžně používá pro výrobu soustružnických držáků. Jelikož je plánováno při experimentu měnit úhel čela (v hodnotách  $-7^\circ, 0^\circ, +7^\circ$ ), je zapotřebí vyrobit 3 varianty obráběcích nožů. Nástroje se vyráběly v halových laboratořích RTI a celkem byly vyrobeny čtyři kusy, z nichž jeden byl pouze rezervní. Modely obráběcích nožů jsou vytvořeny v softwaru Catia V5R21. Model ve variantě úhlu čela  $\gamma = 0^\circ$  je znázorněn na obrázku 23.

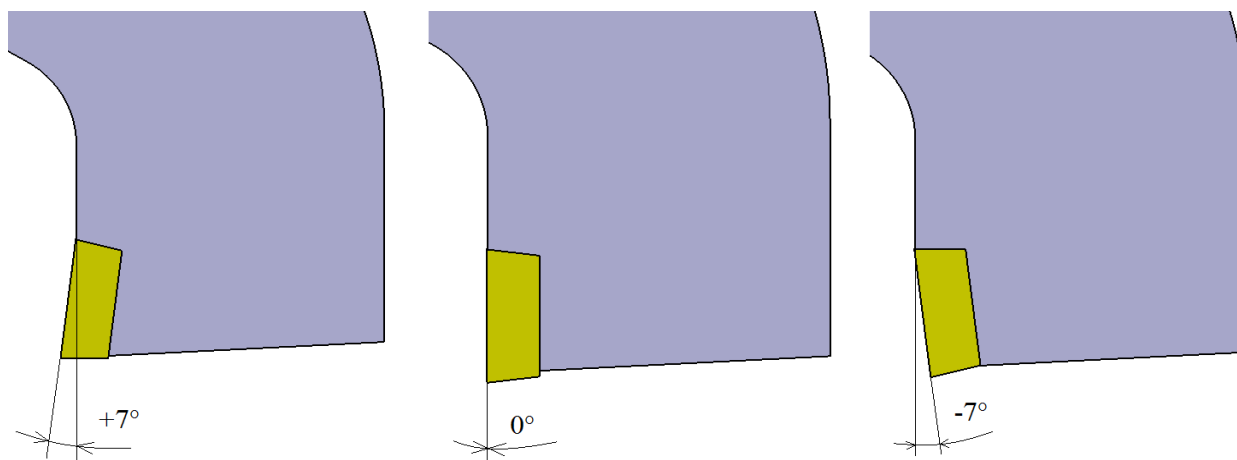
C	Si max.	Mn	P max.	S max.	Cr	Mo	Ni	V
0,38 -0,45 %	0,4 %	0,6-0,9 %	0,025 %	0,035 %	0,9-1,2 %	0,15-0,3 %	---	---

Tabulka 7 - Chemické složení oceli 42CrMo4 [27]



Obrázek 24 - Model obrážecího nože

Do navržených variant řezného nástroje se upne výměnná břitová destička od firmy Iscar. Břitová destička nese označení SCMW 120408 a jedná se o nepovlakovaný slinutý karbid IC20 určený na dokončovací a hrubovací operace při obrábění hliníku, litiny a korozivzdorné oceli. VBD bude upevněna k nástrojovému držáku šroubem SR 16-212 o rozměrech M5x0,8. Po upevnění břitových destiček do jednotlivých variant držáku bude sklon nastavení úhlu čela  $\gamma$  vypadat následovně.

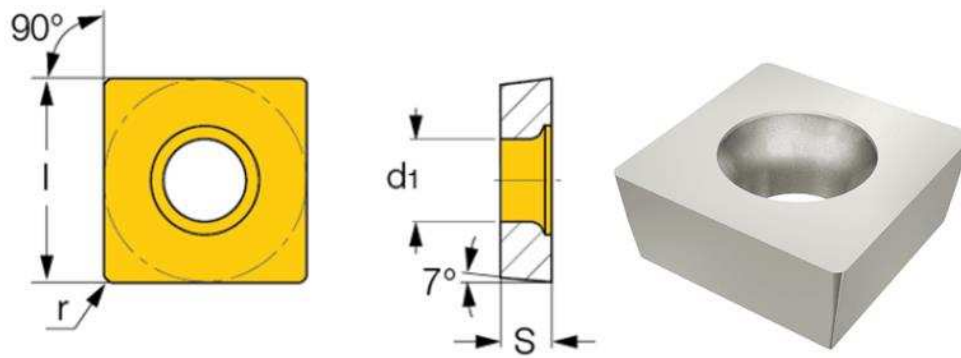


Obrázek 25 - Varianty obrážecího nože



Obrázek 26 - Reálná podoba obrážecích nožů

Rozměry břitové destičky jsou:  $l = 12,7$  mm;  $S = 4,76$  mm;  $r = 0,8$  mm;  $d_1 = 5,5$  mm



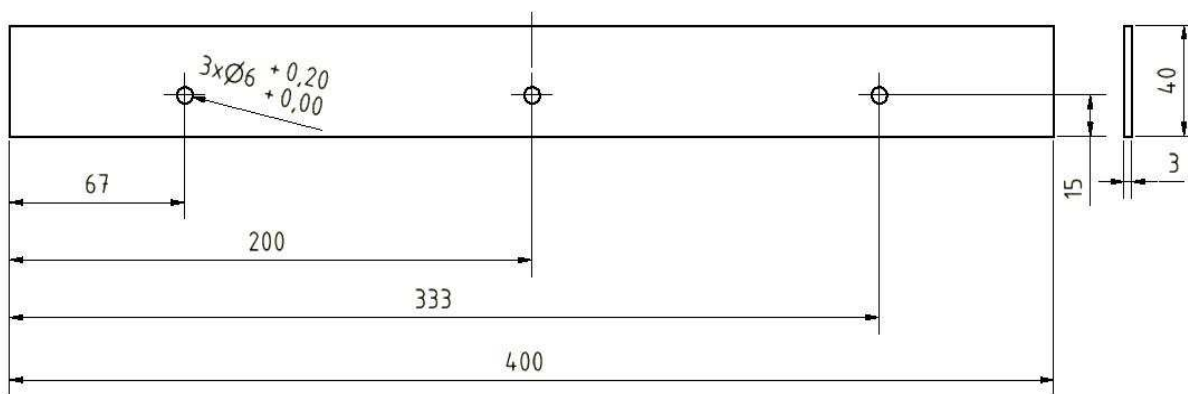
Obrázek 27 - Břitová destička SCMW 120408 [28]



#### 4.4 Obrobek s žárovým nástřikem Stellite 6

Pro plánovaný experiment jsme si již určili použitý stroj, nástroj a technologii. Nyní je potřebné zvolit i adekvátní tvar obrobku. Jednou z hlavních podmínek pro ortogonální volné řezání je to, že šířka řezu musí být vždy větší, než šířka obráběného materiálu. Dále jsme omezení maximální obrážecí délkou, která je podle uvedených informací 560 mm. Vzhledem k tomu, že pro obrábění žárových nástřiků jsou charakteristické hloubky řezů v řádech desetin milimetrů, je pro obrobek důležitá i požadovaná přesnost a rovinnost obráběné plochy.

Z výše uvedených důvodů byl jako polotovary vybrán ocelový plech o rozměrech 400 x 40 mm s šířkou 3 mm z materiálu 11373 dle ČSN. Jedná se o neušlechtilou ocel obvyklé jakosti. Je vhodná ke svařování pro méně namáhané strojní součásti. [29]



Obrázek 28 - Rozměry obrobku

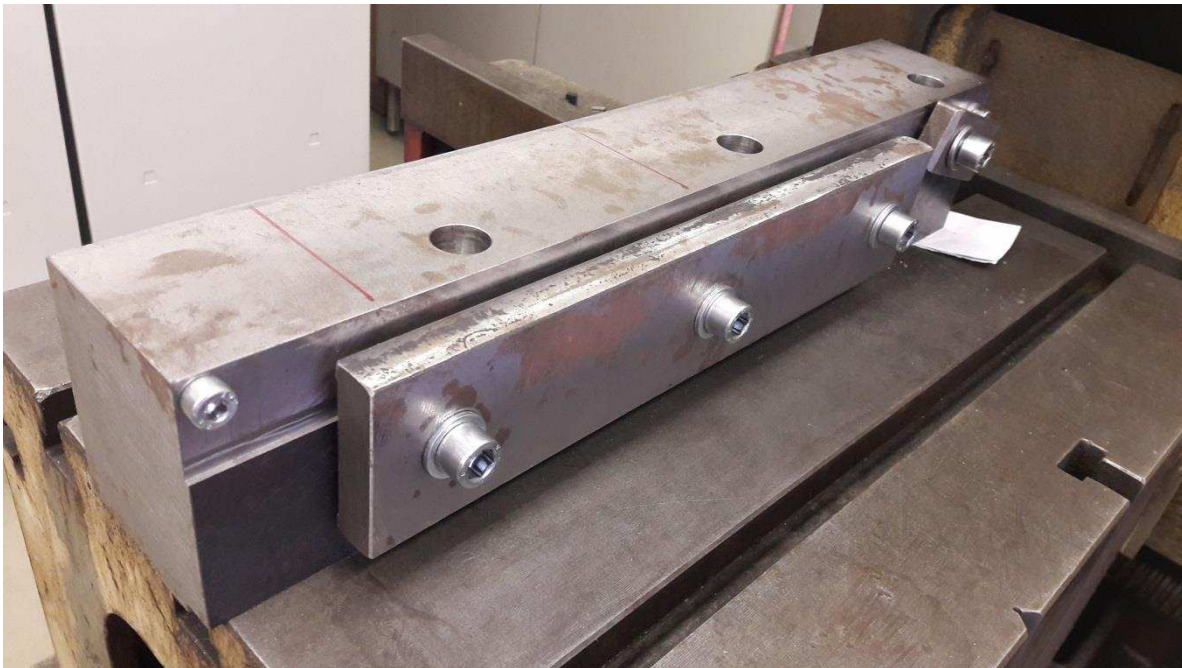
Pro snadnější a rovnoměrnější aplikaci žárového nástřiku byly polotovary pomocí děr sešroubovány v jeden kompaktní celek. Nástřik byl nanesen technologií vysokorychlostního nástřiku plamenem značenou jako HVOF. Tato technologie je, jak již bylo řečeno v předchozích kapitolách, v současné době nejvhodnější variantou pro nanášení slitiny Stellite 6. Mezi jednotlivé polotovary byly navíc vloženy vymežující plechy o šířce 1 mm, sloužící jako vymežovač a ochrana před jejich spojením. Pro lepší představu je sestava již s naneseným žárovým nástřikem Stellite 6 zobrazen na obrázku 29. Abychom se při obrábění nedostali na základní materiál (ocelový plech) je třeba uvést tloušťku nanesené vrstvy, která je v rozmezí 0,4 až 0,5 mm.



Obrázek 29 - Polotovary s již nanesenou stelitovou vrstvou [6]

#### 4.5 Přípravek pro upnutí obrobku

Navržený přípravek již vychází z rozměrů zvoleného polotovaru. Cílem pro návrh přípravku bylo jednoduché, ale zároveň spolehlivé upnutí s možností rychlé výměny obrobených polotovarů. I když je přípravek navržen především na tenké plechy o délce do 400 mm, při správné konstrukci polotovarů do něj lze upnout i složitější součásti. Plech zajišťují před pohybem do stran čtyři imbusové šrouby a na spodní straně dosedá na vnější plochu přípravku. Plech se opírá o šroub, který brání polotovaru v pohybu vpřed.



Obrázek 30 - Přípravek pro upínání plechů

## 4.6 Řezné podmínky

V experimentu jsme se rozhodli variovat veškeré měnitelné parametry stroje. Řezná rychlost se bude měnit v rozsahu  $v_c = 20 - 55$  m/min ve čtyřech krocích. Dále bude měněna hloubka řezu  $a_p$  ve dvou variantách 0,1 a 0,3 mm. Poslední měněná veličina se týká nastavení úhlu čela  $\gamma$  u řezného nástroje v hodnotách:  $-7^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $+7^\circ$ . Vyložení nožů při obrábění bude pevně nastaveno na 90 mm.

## 4.7 Průběh experimentu

Před samotným začátkem plánovaného experimentu je potřeba obráběcí stroj promazat a rozběhnout za určitých řezných podmínek. Tímto lze předcházet nepřesnostem, které jsou způsobeny postupným zahříváním stroje.

Celý proces proběhne bez chlazení a jakéhokoliv mazání. Celkem je plánováno obrobít 24 polotovary s žárovým nástřikem Stellite 6. Polotovary jsme před upnutím vizuálně zkontrolovali, jestli nejeví známky poškození žárového nástřiku. Pro každý řez bude použita nová řezná hrana břitové destičky. U každého obrobku se provede nejprve prvotní úběr 0,1 mm, který slouží pro srovnání žárového nástřiku a také pro zařiznutí nové řezné hrany destičky. Prvotní srovnání je velmi důležité, jelikož bez něj by nebyla při druhém řezu zaručena konstantní hloubka řezu. Po provedení řezu bude obsluhou stroj zastaven v horní úvrati. Proběhne výměna obrobků a otočení nebo výměna břitové destičky. Pro následné hodnocení bude číslem označena řezná hrana a obrobený polotovar.

Každý řez bude zaznamenáván vysokorychlostní kamerou FASTCAM SA-X2. Nasnímané záběry pak můžeme porovnat s dosaženými drsnostmi povrchu a pokusit se mezi nimi najít určitou závislost.

Plán experimentu je ukázán v tabulce 8 a začne s nastavením parametrů čísla 14.

Číslo	$v_c$ [m/min]	Úhel čela [°]	$a_p$ [mm]
14	43	-7	0,3
18	43	7	0,3
23	55	7	0,1
24	55	7	0,3
19	55	-7	0,1
13	43	-7	0,1
22	55	0	0,3
15	43	0	0,1
20	55	-7	0,3
7	28	-7	0,1
21	55	0	0,1
9	28	0	0,1

Číslo	$v_c$ [m/min]	Úhel čela [°]	$a_p$ [mm]
16	43	0	0,3
10	28	0	0,3
12	28	7	0,3
8	28	-7	0,3
11	28	7	0,1
5	20	7	0,1
6	20	7	0,3
1	20	-7	0,1
2	20	-7	0,3
4	20	0	0,3
17	43	7	0,1
3	20	0	0,1

Tabulka 8 - Plán experimentu



Obrázek 31 - Příprava experimentu

## 4.8 Celkové shrnutí

Stroj	Obrázečka Strigon GH560/U
Nástroj	Obrážecí nůž
Držák	Ohnuté provedení
Destička	SCMW 120408
Materiál VBD	Slinutý karbid IC20
Chlazení	Ne
Počet obrobků	24
Žárový nástřik	Stellite 6
Řezná rychlost $v_c$	20, 28, 43, 55 m/min
hloubka řezu $a_p$	0,1 a 0,3 mm
Úhel čela $\gamma$	$-7^\circ$ , $0^\circ$ , $+7^\circ$
Úhel břitu $\beta$	$90^\circ$

Tabulka 9 - Celkové shrnutí plánu experimentu

## 5 Vyhodnocení experimentu

### 5.1 Rozbor žárového nástřiku

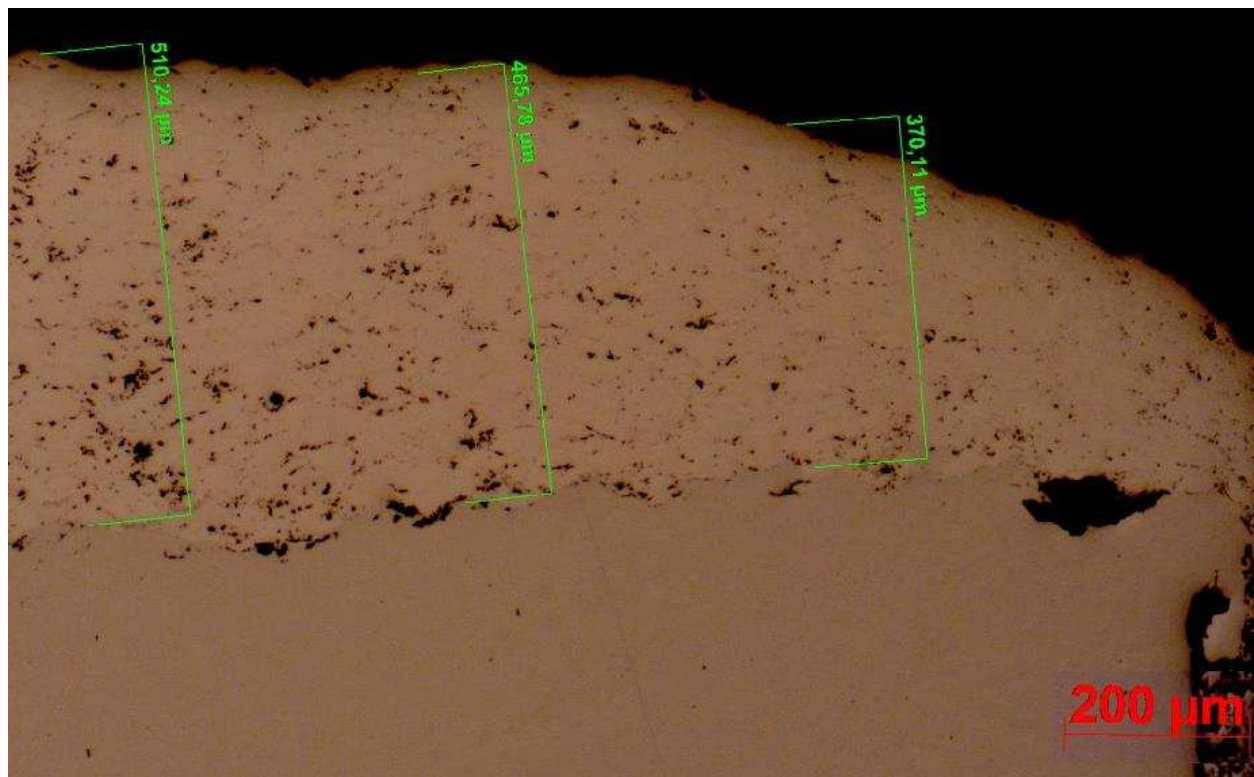
Vzhledem k vyššímu počtu obrobků, než požaduje plán experimentu, byl vybrán jeden náhodný obrobek a odeslán na rozbor. Chemický rozbor, světelná mikroskopie a hodnocení mikrostruktury se provádělo na mikroskopech Olympus BX61 a Zeiss AXIO. Z obrobku byly nejdříve příčně vyříznuty dva čtvercové kousky, na kterých se provedl metalografický výbrus. Následně se provedly a vyhodnotily následující analýzy povlaku:

- Měření tloušťky povlaku
- Měření mikrotvrdosti povlaku a základního materiálu
- Metalografický rozbor
- Chemický rozbor povlaku

Snímky z mikroskopů jsou pořízeny se zvětšením v rozsahu 50x – 1000x.

#### 5.1.1 Měření tloušťky povlaku

Tloušťka žárového nástřiku je výrobcem deklarována v rozsahu 0,4 – 0,5 mm. Po vyhodnocení se ve středu příčného řezu tloušťka pohybuje v rozmezí 0,485 – 0,532 mm. Po okrajích tloušťka postupně klesá, viz obrázek 32.



Obrázek 32 - Měření tloušťky nástřiku (Zeiss AXIO, zvětšení 50x)

### 5.1.2 Měření mikrotvrlosti povlaku

Pro hodnocení tvrdosti se obecně používají zkoušky podle Rockwella, Brinella nebo Vickerse. Hlavním rozdílem mezi výše uvedenými zkouškami je v použití různých vlačovacích těles. Pro měření žárového nástřiku byla vybrána zkouška podle Vickerse.

Zkouška podle Vickerse spočívá v kolmém vlačování čtyřbokého diamantového jehlanu do zkoumaného materiálu. Jehlan má daný vrcholový úhel stěn  $136^\circ$ . Podle velikosti zatížení se Vickers dále rozděluje na zkoušky tvrdosti a mikrotvrlosti. Pro zkoumání mikrotvrlosti jsou hodnoty zatížení maximálně do 0,2 kg. Vickers se značí zkratkou HV (Hardness Vickers) a číslem udávající hodnotu zatížení v kilogramech např.  $HV_{0,2}$ . Tvrdost se počítá z naměřených uhlopříček vtisků, které jsou přepočteny podle použitého zatížení na hodnoty tvrdosti. Vickers se používá pro měření tvrdostí u měkkých i tvrdých materiálů a je omezen pouze měřeným povrchem, který musí být rovný a vyleštěný. [30]

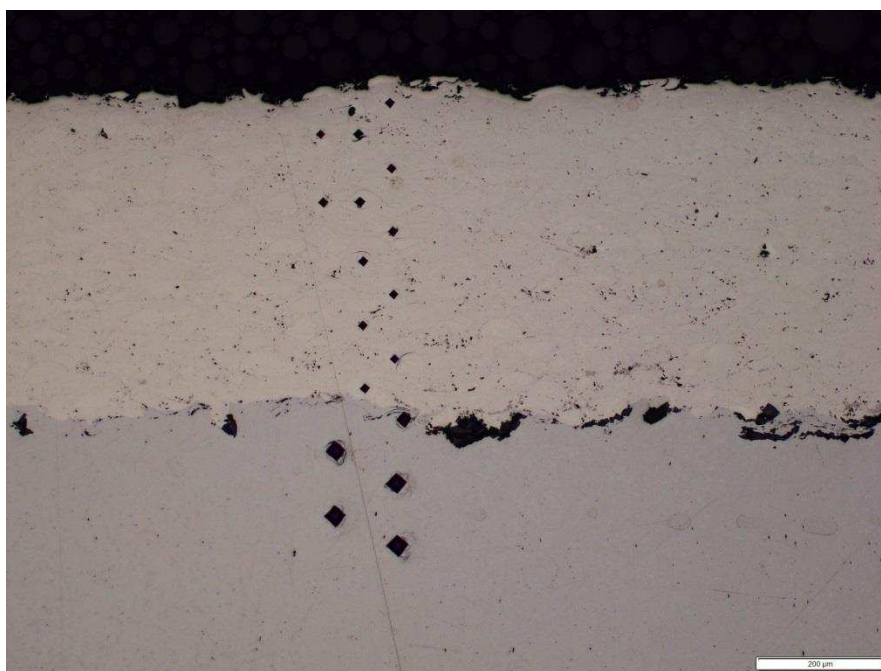
Měření tvrdosti proběhlo na obrobku ve dvou vzdálenostech. Zatěžující síla byla 0,2 kg. Hodnoty se pohybují okolo 700 HV. Ve vzdálenosti 0,5 mm nastává výrazný pokles tvrdosti, z důvodu přechodu žárového nástřiku na základní materiál, kterým je ocel 11 373 dle ČSN.

Měření č. 1	
Od okraje [mm]	0,05 0,1 0,15 0,2 0,25 0,3 0,35 0,4 0,45 0,5 0,55 0,6 0,65 0,7
HV <sub>0,1</sub>	634 793 736 650 623 627 731 680 741 646 284 182 164 148

Měření č. 2	
Od okraje [mm]	0,05 0,1 0,15 0,2 0,25 0,3 0,35 0,4 0,45 0,5 0,55 0,6 0,65 0,7
HV <sub>0,1</sub>	579 730 650 693 534 519 731 569 456 332 192 166 147 149

Tabulka 10 - Naměřené hodnoty tvrdosti dle Vickerse



Obrázek 33 - Zkouška tvrdosti dle Vickerse (Olympus BX61, zvětšení 100x)

### 5.1.3 Metalografický rozbor

Metalografický rozbor se provádí z metalografického výbrusu. Snímky jsou pořízeny z mikroskopu Olympus BX61 při zvětšení 50x – 1000x. Světelná mikroskopie byla provedena v leptaném a neleptaném stavu. Jako leptadlo byl zvolen 3% Nital. Na obrázku 35 je vidět lamelární struktura typická pro žárové nástřiky. Na rozhraní se ve větší míře vyskytují vměstky a nečistoty. Povlak obsahuje i určité procento pórů a pravděpodobně i zoxidované částice, které však nelze jednoznačně určit pomocí fotografie.



Obrázek 34 - Světelná mikroskopie (Olympus BX61, leptáno, zvětšení 200x)



Obrázek 35 - Světelná mikroskopie (Olympus BX61, leptáno, zvětšení 1000x)

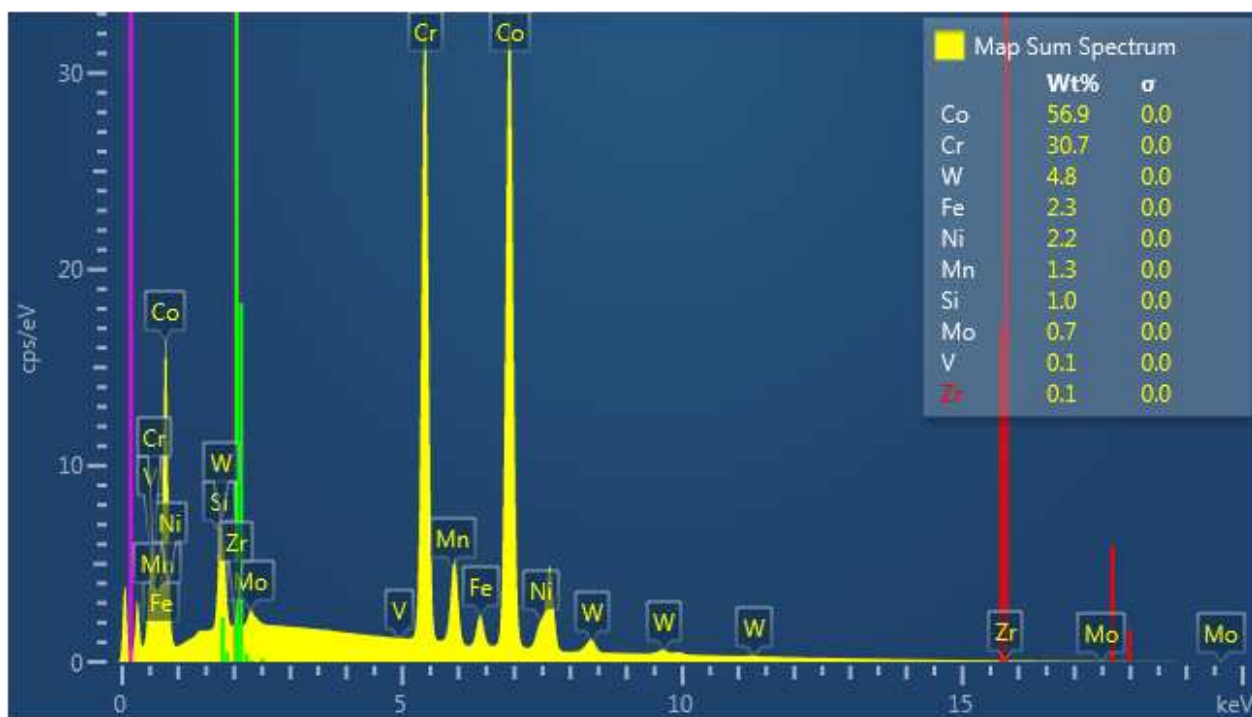
### 5.1.4 Chemický rozbor povlaku

Chemické rozborů žárových nástřiků se provádí proto, abychom zjistili, jakým způsobem se liší chemické složení použitého prášku od chemického složení již naneseného povlaku. Tento rozdíl je způsoben především teplotou při vytváření nástřiku, při kterém dochází vlivem vysoké teploty k určitým strukturním změnám. Někdy může dokonce dojít k částečnému nebo úplnému vypaření některých prvků.

Chemické složení nanášeného prášku bohužel neznáme, proto jsme se rozhodli porovnat pouze naměřené chemické složení s tabulkovými hodnotami nástřiku Stellite 6. Měření proběhlo na několika místech s velmi podobnými výsledky chemického složení.

Co	Cr	W	C	Ni	Fe	Si	Mo	Mn	ostatní
45 - 60 %	27 - 32 %	4 - 6 %	0,9 - 1,4 %	max. 3 %	max. 3 %	max. 1,5 %	max. 1 %	max. 1 %	max. 1 %

Tabulka 11 - Chemické složení slitiny Stellite 6 podle tabulek [10]



Obrázek 36 - Naměřené chemické složení obrobku

Při porovnání naměřených hodnot z tabulky na obrázku 36 a tabulkových hodnot pro slitinu Stellite 6 vyplývá, že chemické složení měřeného povlaku procentuálně odpovídá hodnotám tabulkovým s výjimkou manganu. Mangan by podle tabulky 11 měl dosahovat maximálně 1 %. Tato drobná odchylka nemá na slitinu zásadní vliv, jelikož se jedná o doprovodný prvek a rozdíl je pouhých 0,3%.



## 5.2 Měření drsnosti obrobeného povlaku

Drsnost neobrobeného žárového nástřiku se udává okolo  $R_a = 6 \mu\text{m}$ . Tato hodnota je ovlivněna samotnou strukturou, která se skládá z natavených nebo částečně natavených deformovaných částic (splatů). Dále obsahuje množství vměstků, nečistot, pórů a oxidů. Drsnost povlaků je také ovlivněna metodou nanášení a typem přídatného materiálu. V případě materiálu ve formě prášku závisí na chemickém složení a na velikosti částic. Pro většinu strojního využití je potřeba nástříkaný povlak obrobit a snížit tak jeho drsnost povrchu.

V našem případě probíhalo měření profilové drsnosti na zařízení Hommel Etamic T8000, které měří drsnost povrchu pomocí dotyku hrotu. Podle normy DIN EN ISO 4288:1998 byl vybrán hrot s velikostí  $2 \mu\text{m}$ . Měření probíhalo na 7 místech polotovaru s konstantní měřenou délkou 4,8 mm. Posuvová rychlost byla zvolena na  $v_t = 0,50 \text{ mm/s}$  a během měření se zaznamenávalo 16 000 hodnot. Průběh měření je možné vidět na obrázku 37.



Obrázek 37 - Průběh měření drsnosti na Hommel Etamic T8000

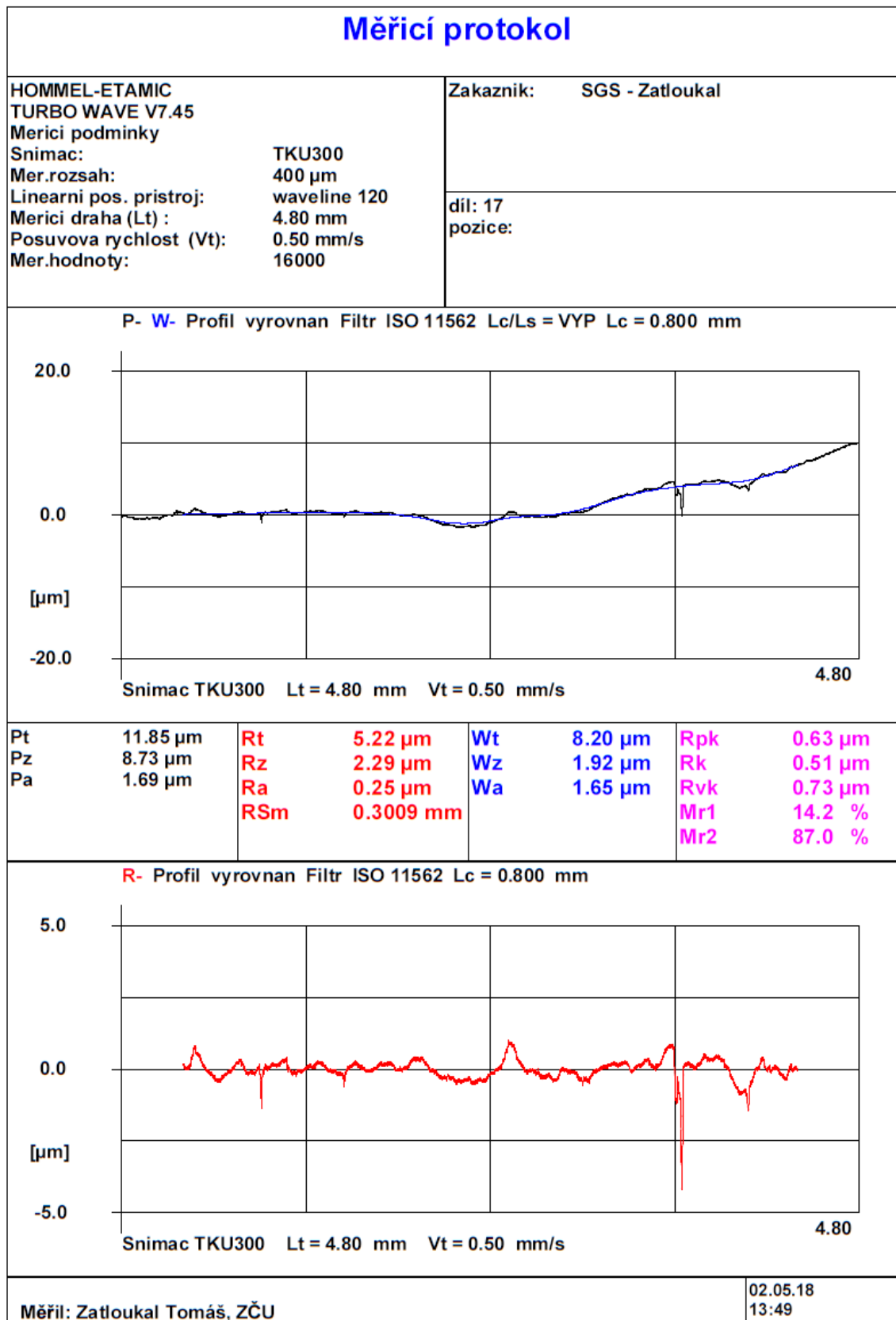
Pro hodnocení drsnosti jsou měřeny následující hodnoty (Tabulka 12). Na následující stránce je uveden vzhled záznamového archu pro plech s číslem 17, na kterém byla dosažena nejlepší drsnost povrchu  $R_a$  ze všech obrobených polotovarů a to  $R_a = 0,25 \mu\text{m}$ .

Celková výška profilu	$R_t, W_t, P_t$
Nejvyšší výška profilu	$R_z, W_z, P_z$
Průměrné aritmetická hodnota	$R_a, W_a, P_a$
Průměrná šířka prvků profilu	$R_{sm}$
Hloubka jádra profilu drsnosti	$R_k$
Materiálový podíl	$R_{mr1}, R_{mr2}$
Redukované výšky výstupků	$R_{pk}$
Redukované hloubky prohlubní	$R_{vk}$

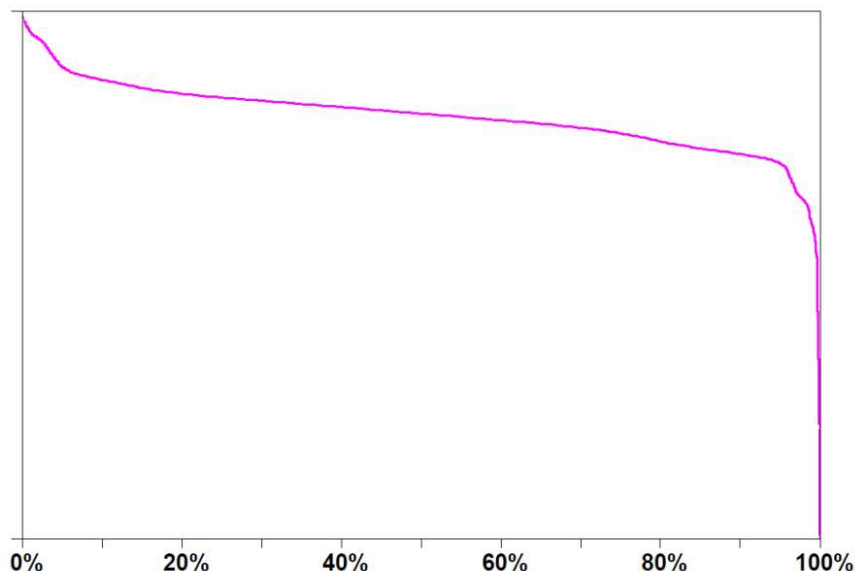
P	Parametr vypočítaný ze základního profilu
R	Parametr vypočítaný z profilu drsnosti
W	Parametr vypočítaný z profilu vlnitosti

[31]

Tabulka 12 - Popis měřených parametrů drsnosti



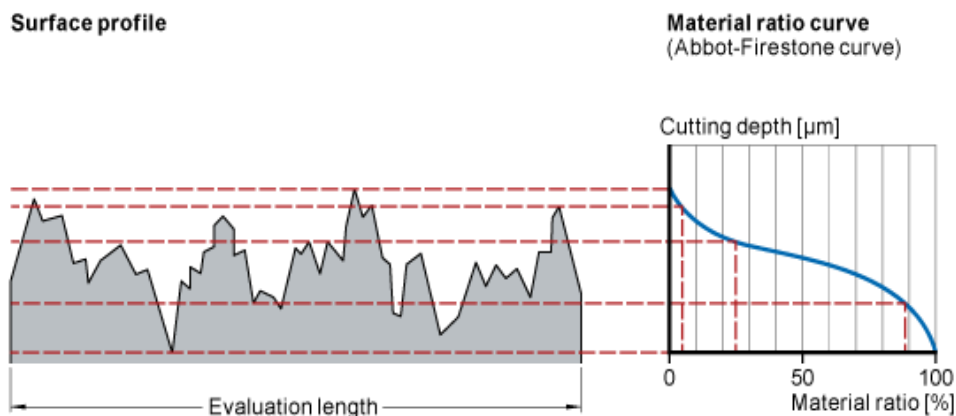
Obrázek 38 - Protokol o měření drsnosti obrobku s číslem 17



Graf 8 - Abbottova křivka profilu pro obrobek 17

Kompletní seznam všech naměřených hodnot drsností je zaznamenán v tabulce, která se nachází v příloze 1. Z výsledků je patrné, že velmi dobré drsnosti do  $Ra = 0,5 \mu\text{m}$  bylo dosaženo hned u několika obrobků ve všech možných kombinacích hloubky řezu, řezné rychlosti a úhlu čela. Nejlepší výsledek byl dosažen u obrobku 17 s  $Ra = 0,25 \mu\text{m}$ .

Z uvedených parametrů lze sestavit Abbottovu křivku neboli křivku podílu materiálu. Na grafu č. 8 je tato křivka zobrazena pro obrobek číslo 17. Abbottova křivka nám udává více informací o charakteristice profilu tím, že udává poměr vyplněného materiálu v určitých hloubkách řezu vyjádřených v procentech. Zakřivení ze začátku křivky vytvářejí vrcholy v povrchu. Naopak zakřivení na konci křivky způsobují prohlubně. Tedy pokud křivka klesá pozvolna, poukazuje to na plný profil s menším objemem prohlubní. Na obrázku 40 je grafické vysvětlení způsobu vytváření Abbottovy křivky. [32]



Obrázek 39 - Křivka podílu materiálu neboli Abbottova křivka [32]

Parametry ovlivňující vzhled Abbottovy křivky jsou  $R_k$ ,  $R_{pk}$  a  $R_{vk}$ . Hodnoty  $R_k$ , které udávají hloubku profilu jádra, se až na pár výjimek dostaly pod hodnotu  $R_k = 1,3 \mu\text{m}$ . Nejlepší hodnota byla naměřena u obrobku 17 s  $R_k = 0,51 \mu\text{m}$ . Stejný průběh má i redukovaná výška výstupku  $R_{pk}$  s tím rozdílem, že nejlépe vyšel vzorek 2 s  $R_{pk} = 0,26 \mu\text{m}$ . Hodnota  $R_{vk}$  značí nejnižší redukovanou výšku údolí. Zde jsou již hodnoty výrazně rozdílné a pohybují se v intervalu  $0,36 - 18,28 \mu\text{m}$ , kdy nejlepší výsledek byl naměřen u obrobku 2. Poslední uvedené parametry Abbottovy křivky jsou materiálové podíly  $R_{mr1}$  a  $R_{mr2}$ . Hodnota  $R_{mr1}$  vychází nejlépe u obrobku 17 a značí procentuální množství vrcholů (peaků) z měřeného povrchu. Parametr  $R_{mr2}$  nám po odečtení 100% ukazuje procentuální množství všech naměřených údolí.

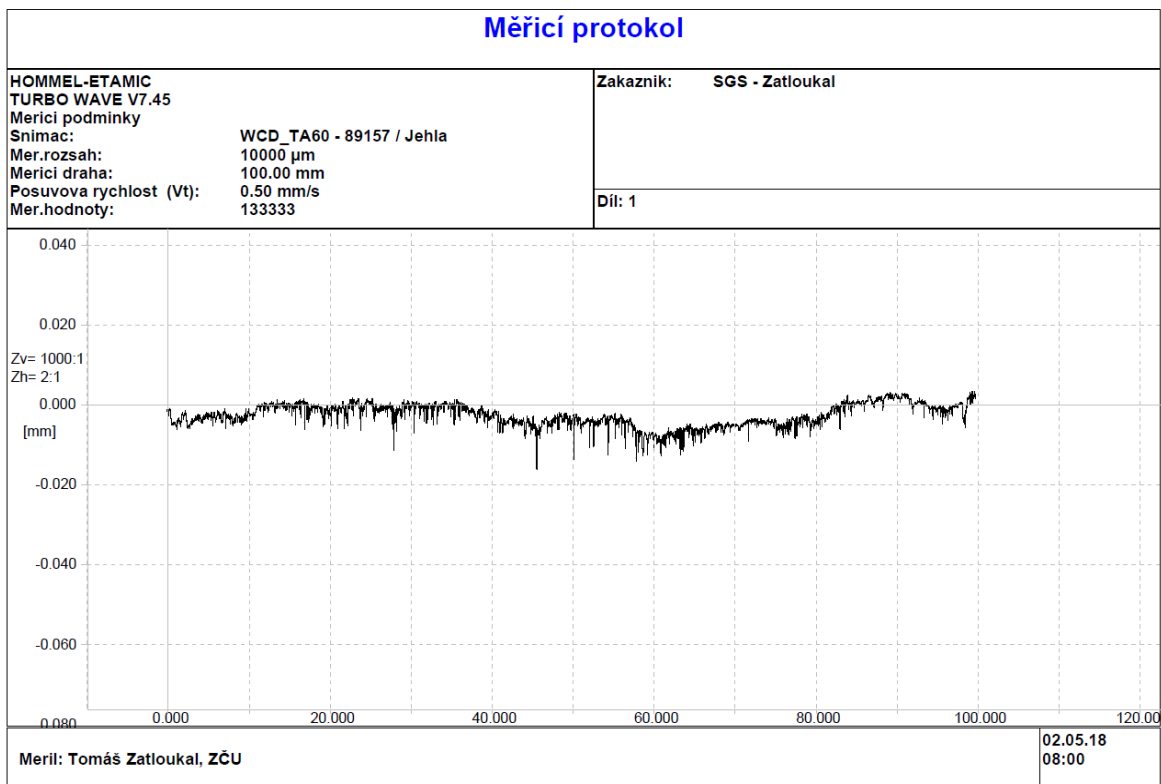
### 5.3 Měření profilu obrobeného povlaku

Měření profilů žárového povlaku probíhalo stejně jako u měření drsnosti na zařízení Hommel Etamic T8000. Zařízení bylo před začátkem přizpůsobeno na měření profilů. Posuvová rychlost zůstala stejná na hodnotě  $v_t = 0,50 \text{ mm/s}$ . Měřená délka byla 100 mm a na této délce se zaznamenávalo 133 333 bodů.

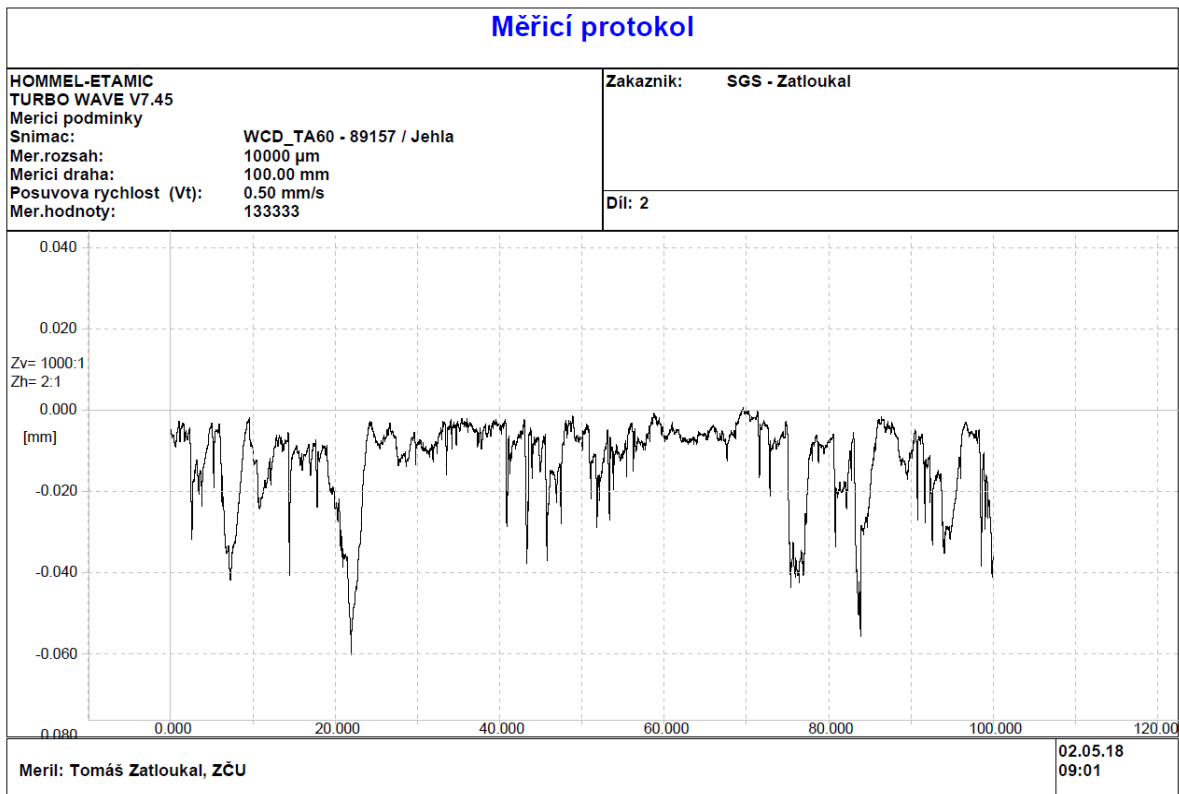


Obrázek 40 - Průběh měření profilu na Hommel Etamic T8000

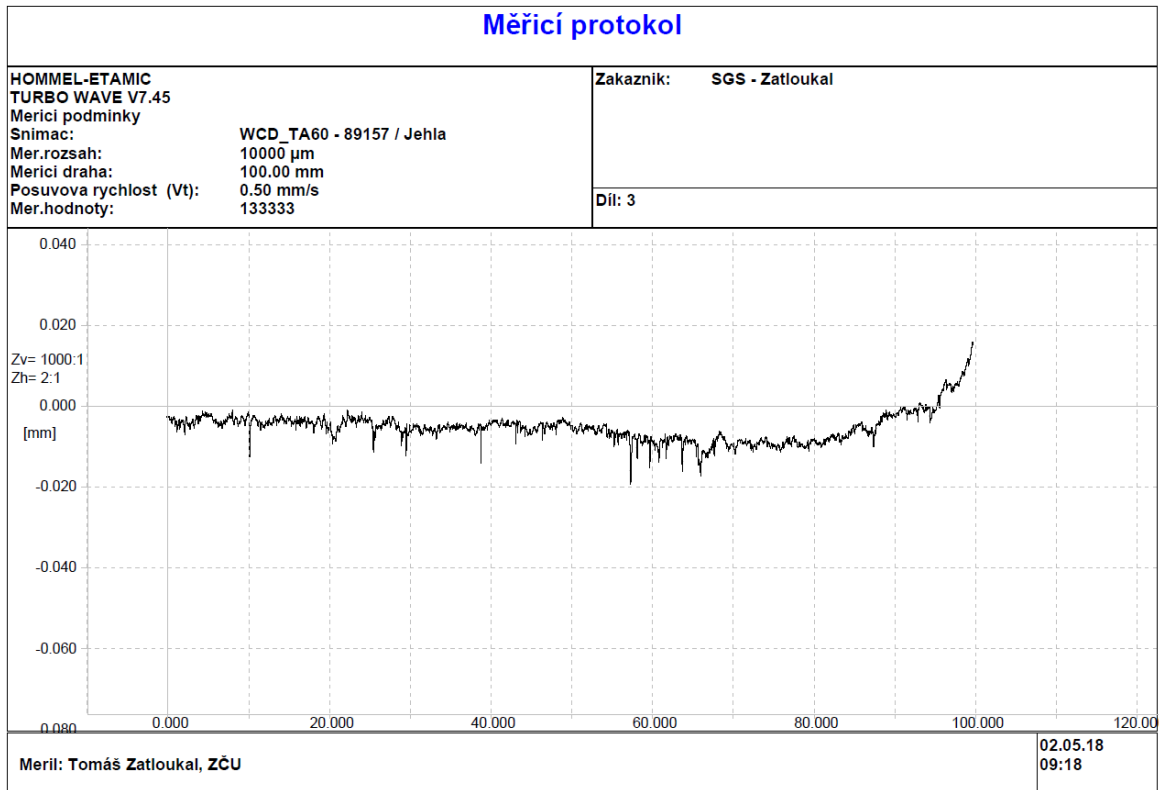
Z vyhodnocených křivek vyplývají výrazné odlišnosti u vzorků s lichým a sudým číslem, což v plánu experimentu představuje změna hloubky řezu. U vzorku s lichým číslem se jedná o hodnotu  $a_p = 0,1 \text{ mm}$  a v případě sudých čísel  $a_p = 0,3 \text{ mm}$ . Na grafech č. 9 – 12 jsou zaznamenány jednotlivé profily vzorků 1 – 4, na kterých je vidět zřetelné zhoršení profilu při úběrech  $a_p = 0,3 \text{ mm}$ .



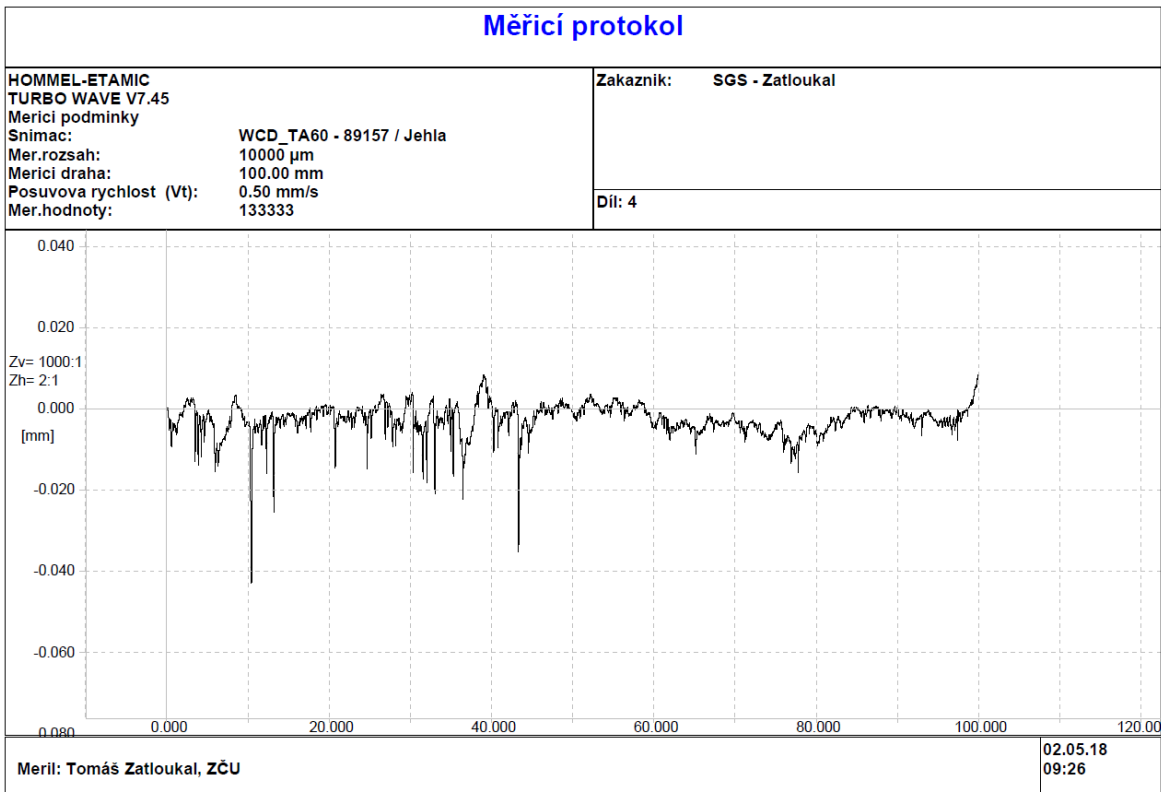
Graf 9 - Měření profilu na obrobku č. 1 ( $a_p = 0,1$  mm)



Graf 10 - Měření profilu na obrobku č. 2 ( $a_p = 0,3$  mm)



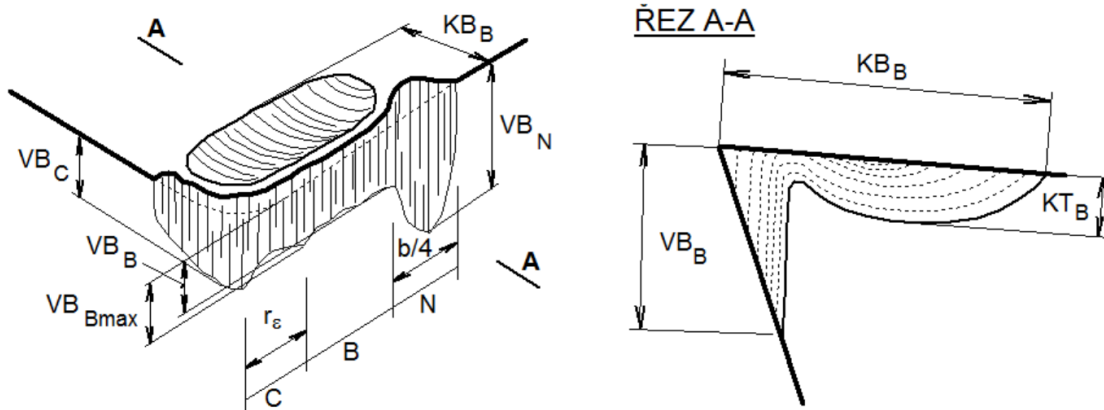
Graf 11 - Měření profilu na obrobku č. 3 ( $a_p = 0,1$  mm)



Graf 12 - Měření profilu na obrobku č. 4 ( $a_p = 0,3$  mm)

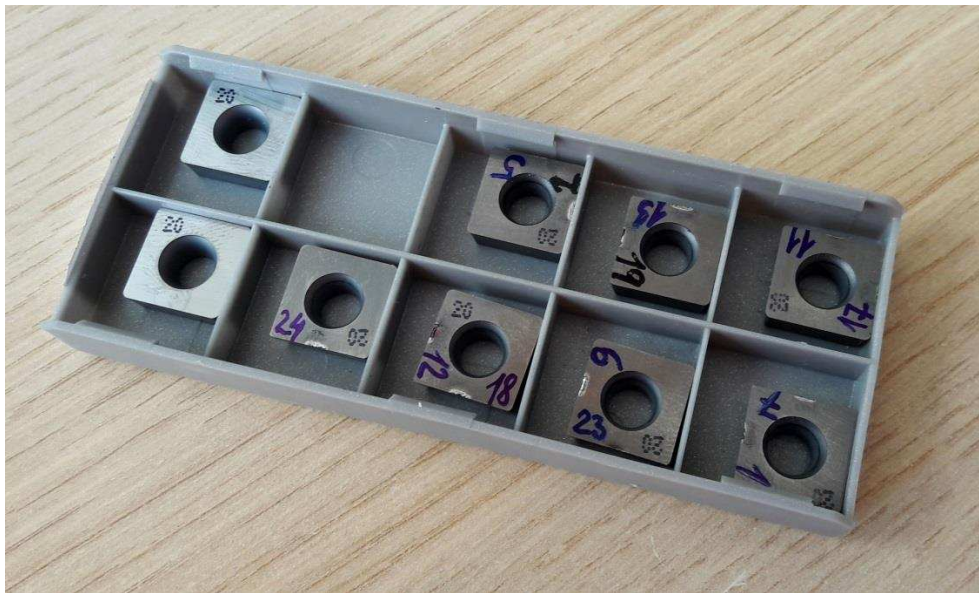
## 5.4 Opotřebení břitové destičky

Plán experimentu byl navržen tak, aby každý řez provedla destička s neopotřebovanou řeznou hranou. Tím jsme anulovali vliv opotřebení řezného nástroje na kvalitu obrobku. Na druhou stranu je vhodné prozkoumat typ a velikost opotřebení v závislosti na měněných parametrech, protože výsledky mohou být nápomocny při pokračování v řešení této problematiky.

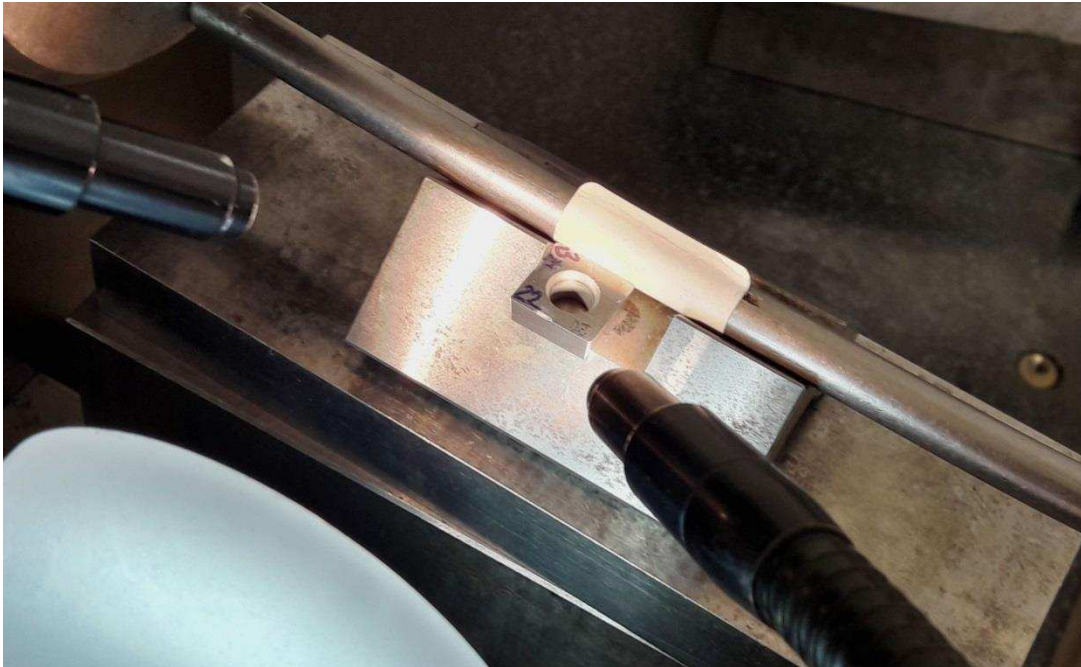


Obrázek 41 - Popis opotřebení břitové destičky [13]

Pro experiment byly použity VBD s označením SCMW 120408 ze slinutého karbidu IC20. Destičky se po vykonání řezu označily stejným číslem jako číslovaný obrobek. Měření opotřebení těchto destiček probíhalo na optickém mikroskopu Multicheck PC500, při kterém se zkoumala řezná hrana, velikost vzniklého vrubu a nárůstku. Velikost naměřených opotřebení jsou zaznamenány v příloze č. 2

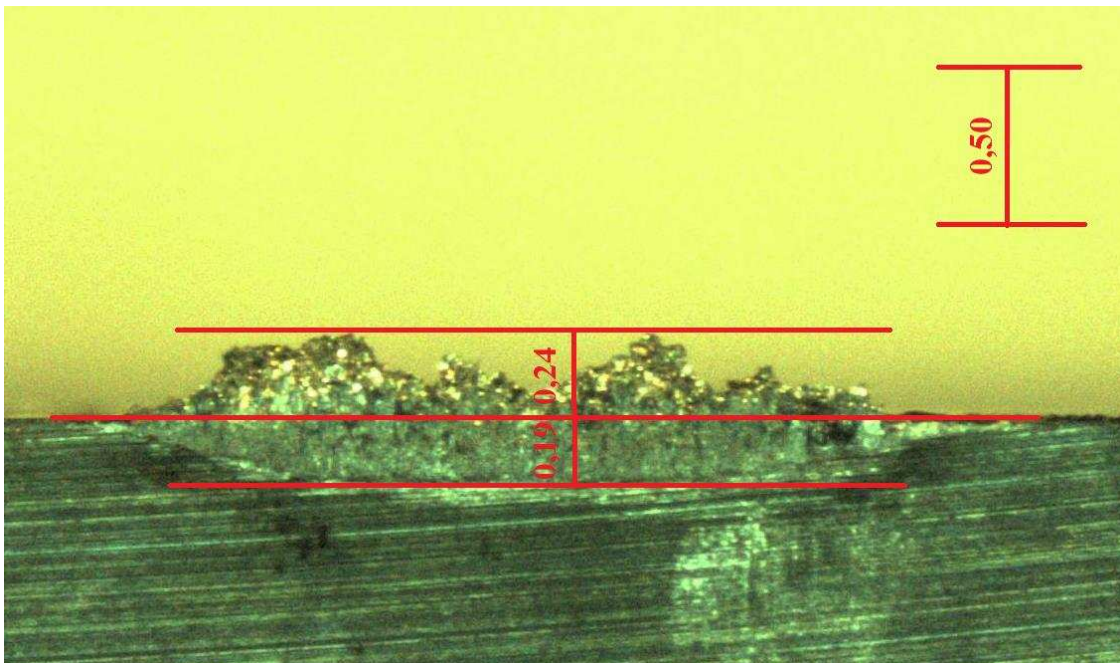


Obrázek 42 - Použité VBD s očíslovanou řeznou hranou



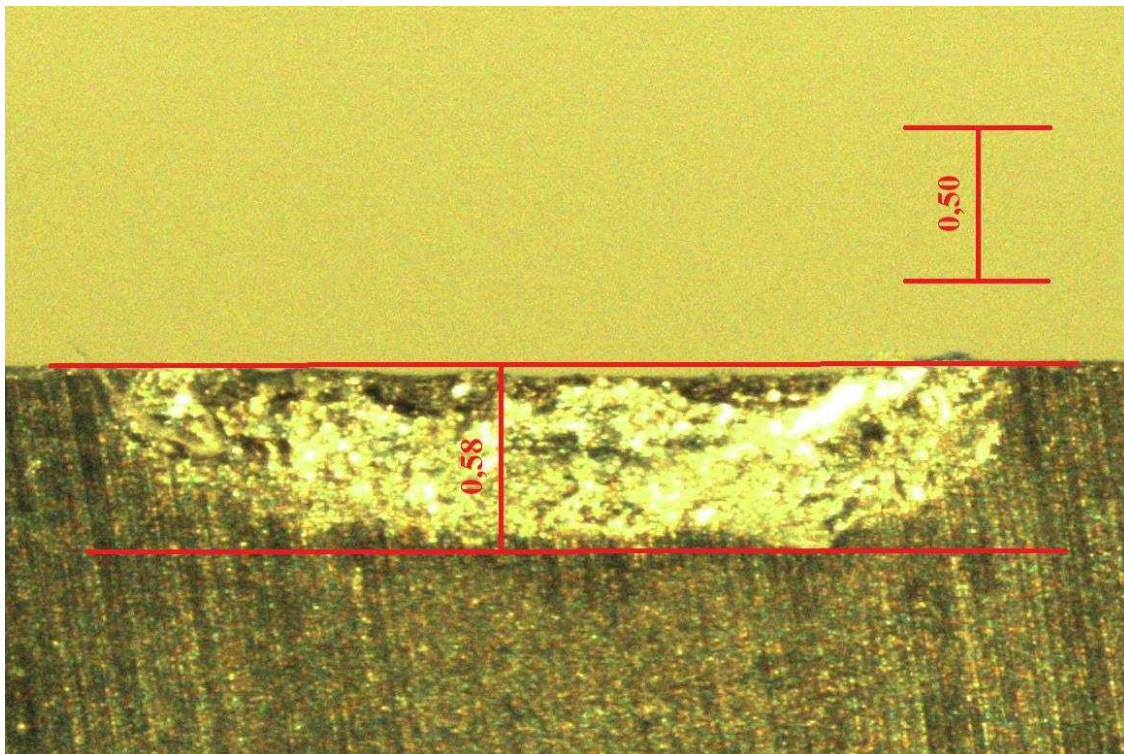
Obrázek 43 - Průběh měření opotřebení na řezné hraně č. 22

Následující snímky jsou pořízené při 90 násobném zvětšení.



Obrázek 44 - Pohled na hřbet VBD s č. 20





Obrázek 45 - Pohled kolmo na čelo VBD s č. 24

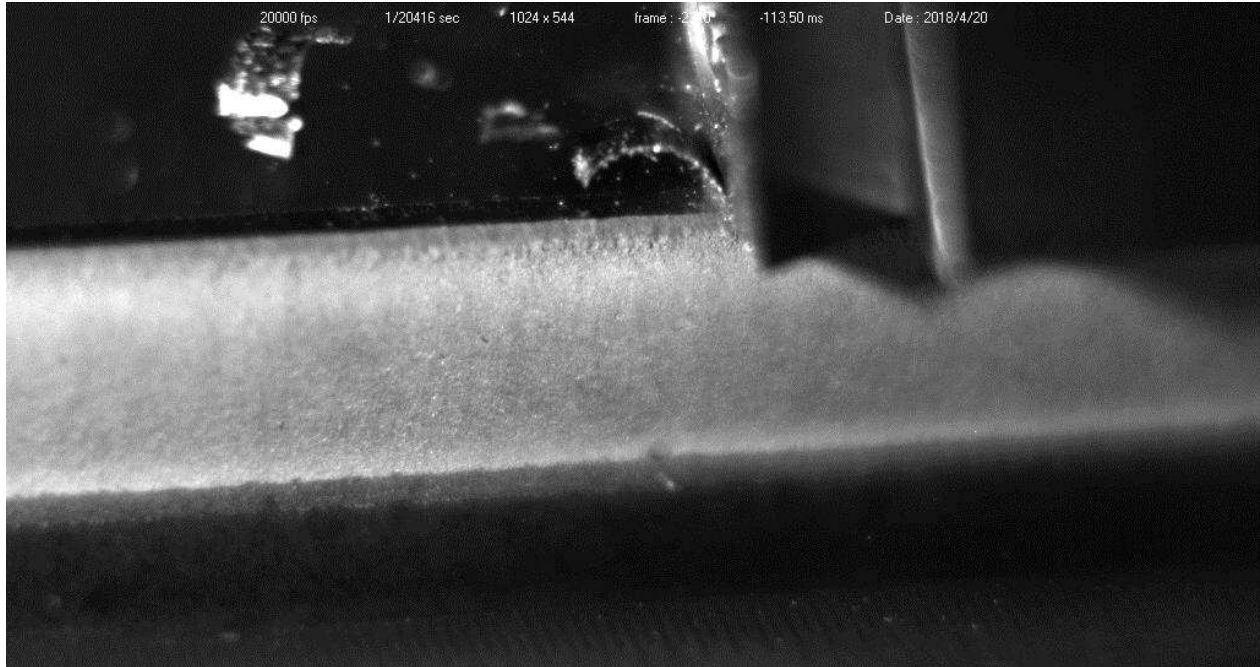
## 5.5 Záznamy z vysokorychlostní kamery

V dnešní době se vysokorychlostní kamery používají i v oblasti strojírenství. Pomocí vysokorychlostní kamery lze odhalit chování břitu v místě řezu, tvorbu a způsob lámání třísky, tuhost stroje, odtažení nástroje atd. Z těchto důvodů jsme se ji rozhodli použít tuto kameru i při našem experimentu.

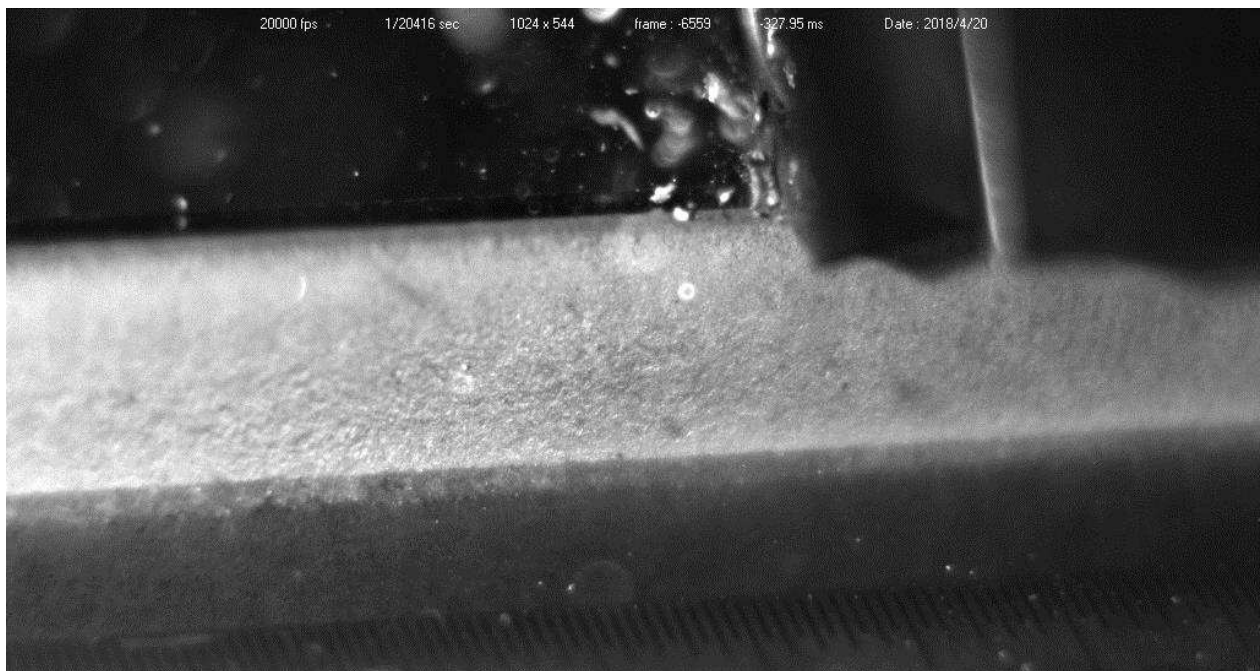
V průběhu experimentu se zaznamenával každý řez vysokorychlostní kamerou FASTCAM SA-X2 1080K 16GB. Tento typ vysokorychlostní kamery dokáže při nejmenším možném rozlišení 128 x 8 zaznamenat až 1 milion snímků za sekundu. Pro náš experiment byla kamera nastavena na vyšší rozlišení 1024 x 544 se záznamem 20 000 snímků za sekundu. Po skončení záznamu se pomocí programu Photron FASTCAM Viewer jednotlivé snímky spojily a překonvertovaly do požadovaného videa. [33]

### 5.5.1 Hodnocení tvorby třísky

Po přezkoumání záznamů jednotlivých řezů jsme došli k závěru, že až na některé výjimky nelze vidět zásadní změny při odchodech třísky z místa řezu a to i přesto, že drsnost povrchu je v některých případech velmi odlišná. Třísku lze zařadit mezi třísky stužkovité, což je z velké části způsobeno použitým procesem (ortogonální volné řezání). Tříška obvykle odchází plynule z místa řezu pod úhlem nastavení čela. První zaznamenaná změna tvorby třísky je u obrobku 8, kde se tříška změnila ze stužkovité na třísku elementární. Na snímcích 47 a 48 je patrný rozdíl ve tvaru třísky v závislosti na hloubce řezu.

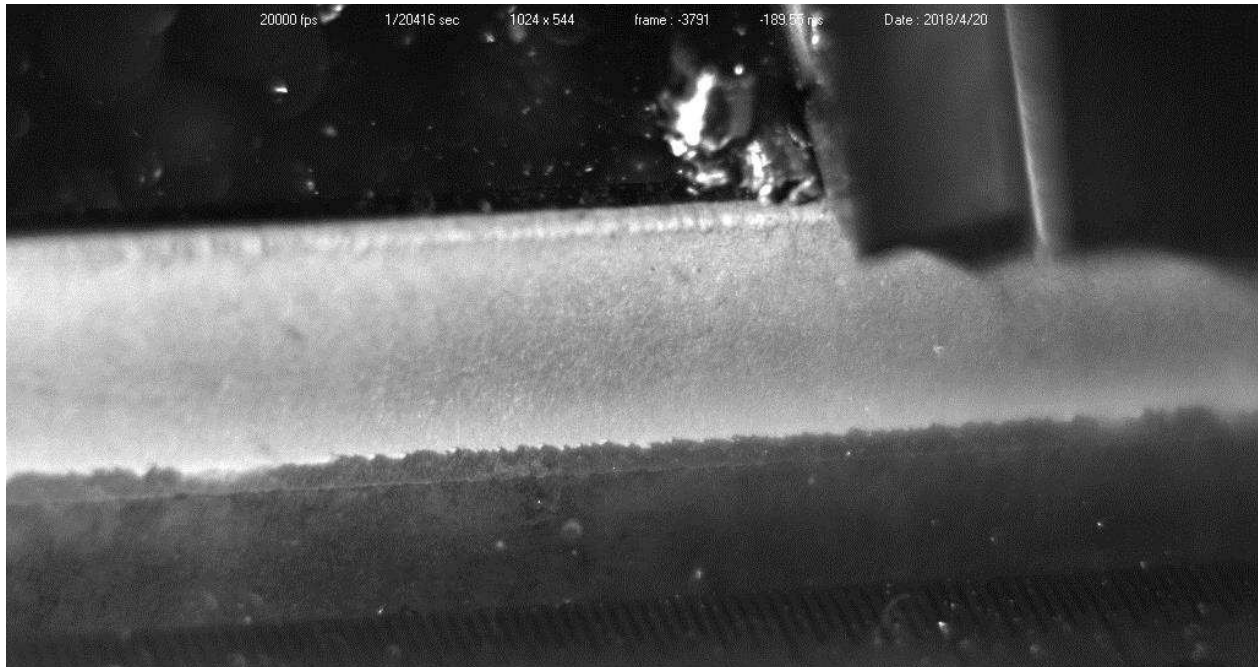


Obrázek 46 - Snímek tvorby třísky u obrobku 7 ( $a_p = 0,1$  mm)



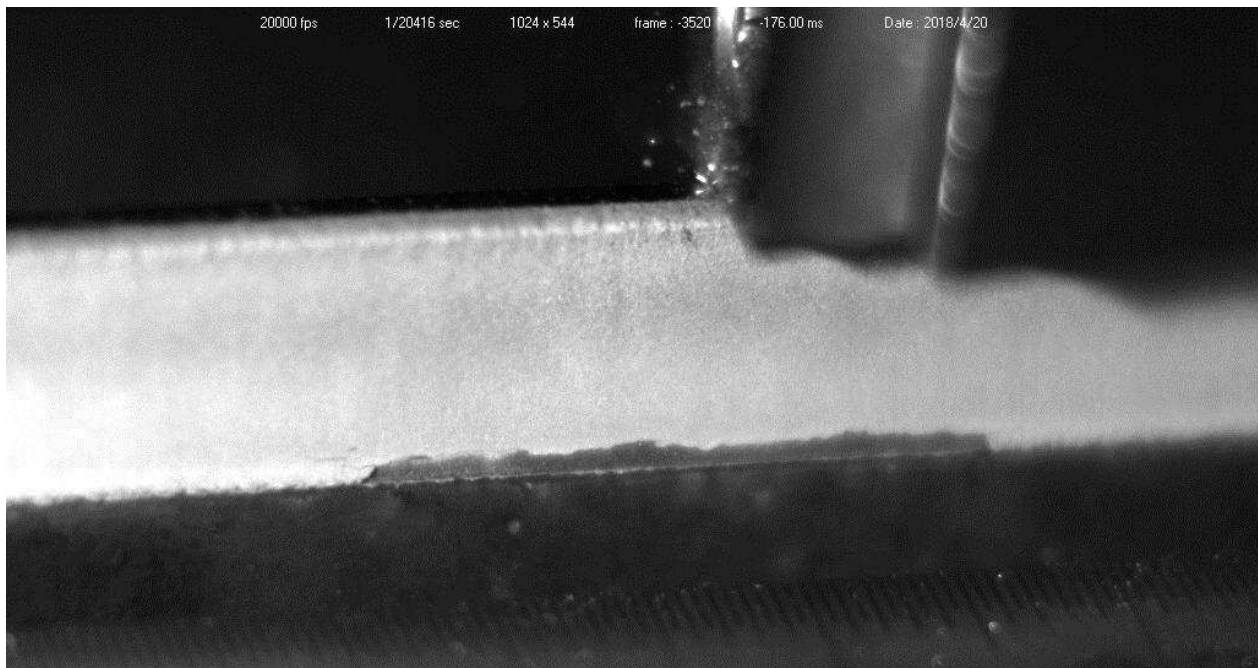
Obrázek 47 - Snímek tvorby třísky u obrobku 8 ( $a_p = 0,3$  mm)

U obrobku číslo 14 bylo zpozorováno hromadění třísky na řezné hraně. To mohlo být způsobeno negativním sklonem břitové destičky a větší hloubkou řezu  $a_p = 0,3$  mm. Toto hromadění třísky má pravděpodobně vliv na nezvykle velký nárůstek naměřený při měření opotřebení VBD. Na obrázku 49 je snímek tvorby třísky u obrobku 14.



**Obrázek 48 - Snímek tvorby třísky u obrobku č. 14**

Poslední zaznamenaný rozdíl se týkal obrobků č. 18, 23, 24. Při obrábění těchto obrobků nedocházelo k odebírání skoro žádné třísky. Vyjmenované obrobky mají společný úhel čela  $-7^\circ$  a vyšší řeznou rychlost  $v_c = 43$  a  $55$  m/min. Za těchto podmínek zřejmě došlo při nárazu na žárový nástřik k otláčení nástroje a břitová destička se již následně nedokázala zaříznout. Tato skutečnost byla zachycena na obrázku 50.



**Obrázek 49 - Odtlačení nástroje u obrobku č. 23**

Je důležité podotknout, že i při rozdílných nastaveních úhlů čela a zvýšených řezných rychlostech nebylo na záznamech z vysokorychlostní kamery zaregistrováno jakékoliv prasknutí žárového nástřiku.

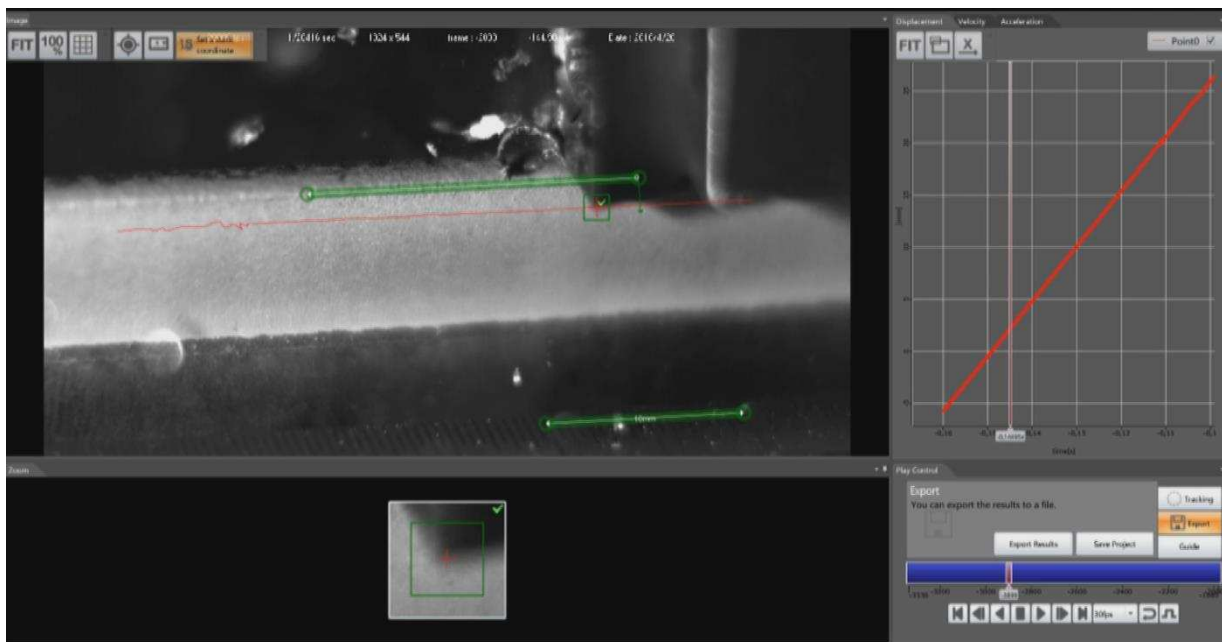
### 5.5.2 Měření rychlosti obrážecího stroje

Obrážecí stroj má z boku uvedenou tabulku, ze které lze vypočítat počet kmitů za minutu při určité obrážecí dráze, kterou vykonává smýkadlo. Pomocí této tabulky a zvolené délky jsme vypočetli průměrnou řeznou rychlost  $v_c$  pro jednotlivé kmity. V našem experimentu jsme se rozhodli použít čtyři nejnižší rychlosti z celkových osmi. Hodnoty kmitů a vypočtená průměrná rychlost jsou zapsány v tabulce 13.

Zadané strojem kmity/min	Původně změř. m/min	Zjištěné mm/s	Přepočet m/min	Poměr původní	Poměr zjištěný
12	20	550	33	1	1
18	28	780	47	1,4	1,42
25	43	1090	65,5	2,15	1,98
35	55	1530	92	2,75	2,78

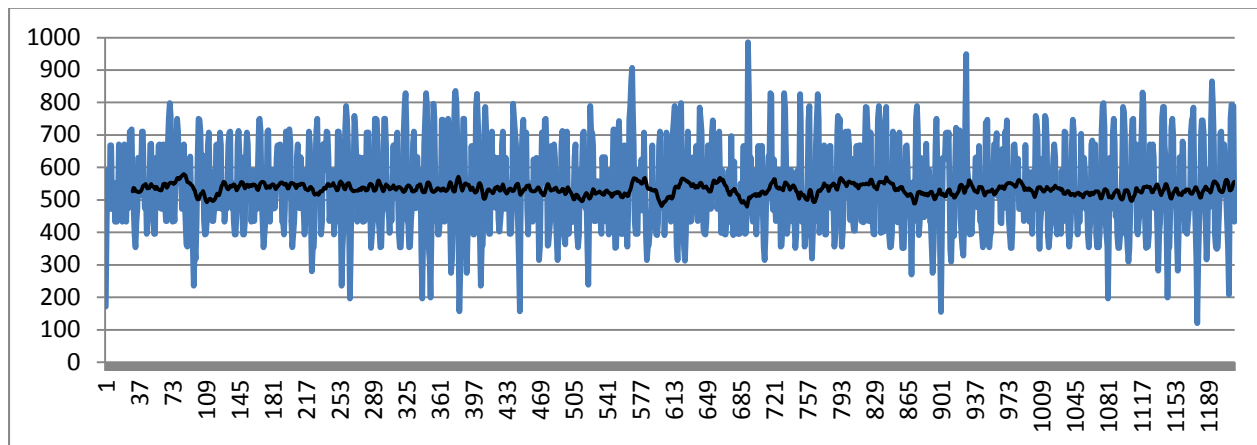
Tabulka 13 - Výpočet a ověření rychlosti obrážecího stroje

Jelikož řezná rychlost obrážecího stroje není konstantní, ale mění se z minima do maxima a následně zpět do minima, bylo by zajímavé zjistit maximální dosahovanou řeznou rychlost při jednotlivých kmitech. Za tímto účelem byla kamera postavena tak, aby zabírala střed řezné dráhy, kde se předpokládá maximální rychlost. Při měření řezné rychlosti je v programu potřeba určit sledovaný bod, směr posuvu a měřítko. Sledovaný bod byl uchycen na špičce VBD, měřítko určeno pomocí přiloženého pravítka vedle obrobku a směr posuvu zadán rovnoběžně s hranou obrobku. Průběh vyhodnocení je zachycen na obrázku 51.

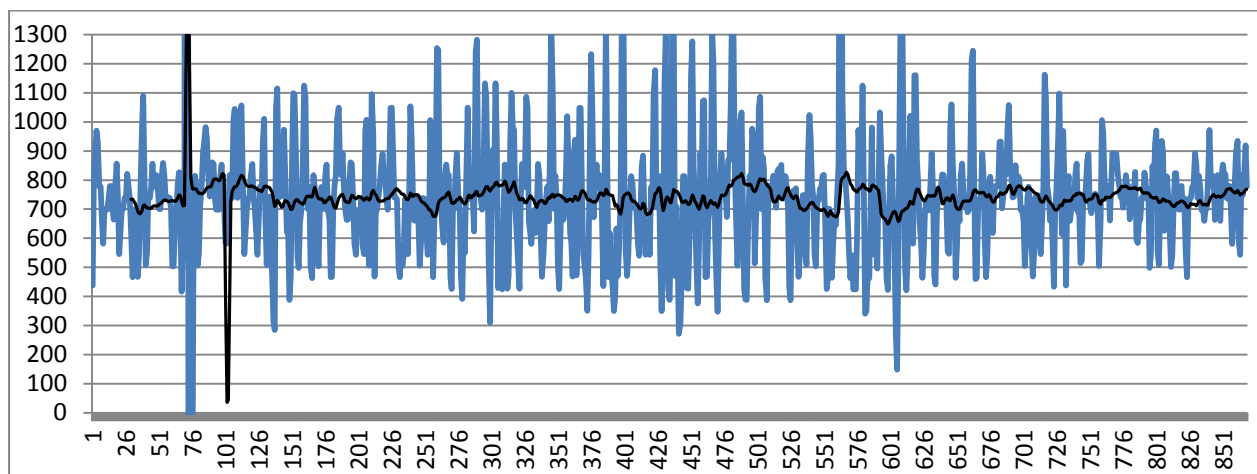


Obrázek 50 - Průběh vyhodnocování řezné rychlosti

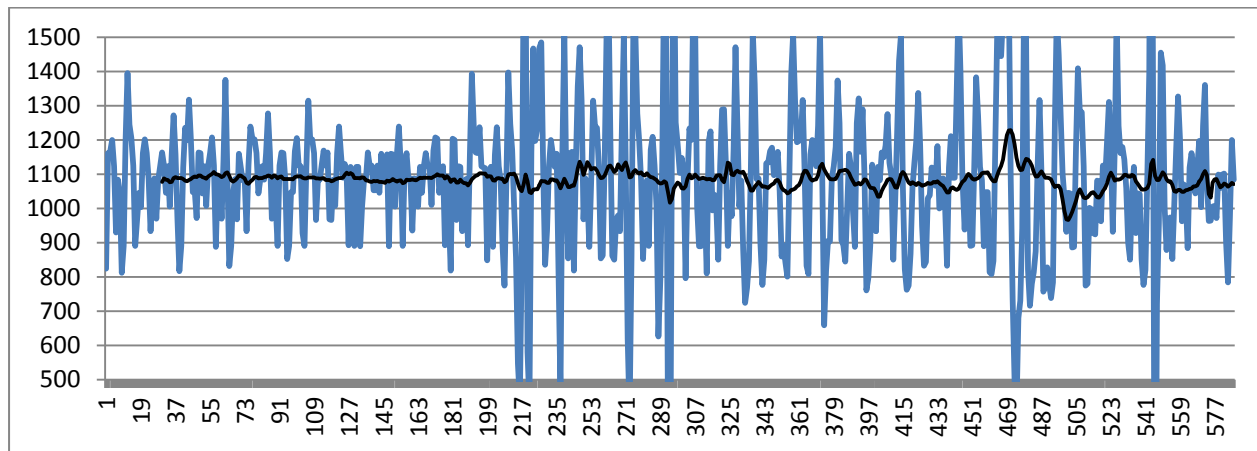
Následně byla pomocí programu změřena aktuální řezná rychlost v místě záběru a získané hodnoty importovány do Excelu, kde z nich byly vytvořeny následující grafy. Průměrné hodnoty získané z grafů a jejich přepočítání jsou zapsány v tabulce 12 ve třetím a čtvrtém sloupci.



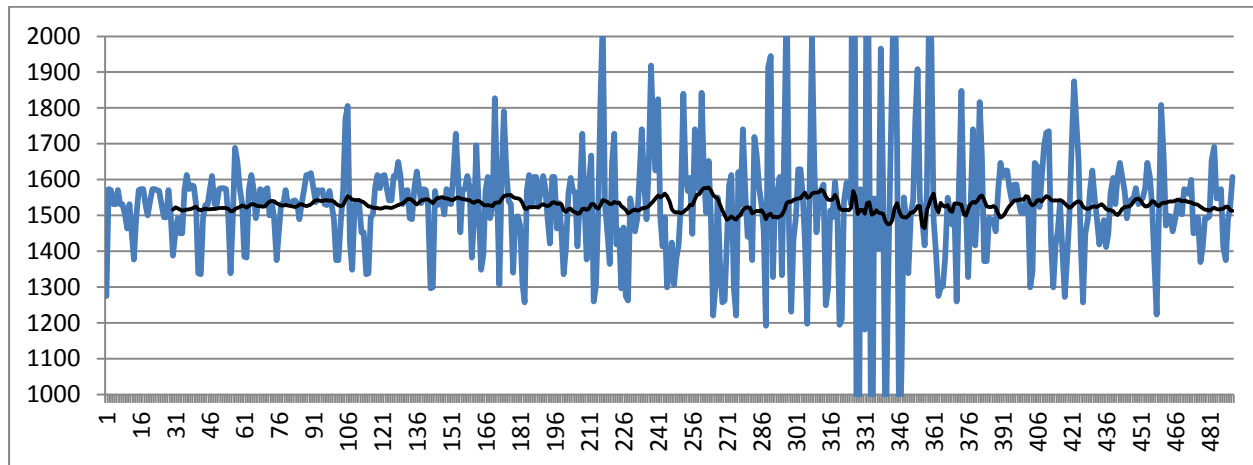
Graf 13 - Naměřené maximální hodnoty při 12 kmitů/s (osa y v mm/s)



Graf 14 - Naměřené maximální hodnoty při 18 kmitů/s (osa y v mm/s)



Graf 15 - Naměřené maximální hodnoty při 25 kmitů/s (osa y v mm/s)



Graf 16 - Naměřené maximální hodnoty při 35 kmitů/s (osa y v mm/s)

Nově zjištěné hodnoty jsou výrazně vyšší než původně naměřené hodnoty, což se předpokládalo. Pro jistotu je vhodné určit poměrovou závislost řezných rychlostí původních a nově změřených, kdy pro nejnižší řeznou rychlost bylo zvoleno poměrové číslo 1. Při porovnání jednotlivých poměrů lze předpokládat, že maximální řezná rychlost je vypočtena správně.

## 5.6 Statistické vyhodnocení

Statistické vyhodnocení je metoda založená na analýze dat a umožňuje vyhodnotit získané informace o celku i jeho částech. Pro náš experiment, který byl navržen metodikou plánovaného experimentu, proběhne hodnocení metodou analýzy rozptylu. Pomocí statistického vyhodnocení určíme vlivy jednotlivých faktorů a jejich interakcí v závislosti na parametrech drsnosti  $R_t$ ,  $R_a$ ,  $R_z$ , a  $R_q$ .

Analýza rozptylu je metoda matematické statistiky označovaná také jako ANOVA (**A**nalysis **O**f **V**ariance). Používá se v situacích, kdy je potřeba určit vliv jednoho nebo více nominálních proměnných (faktory) na proměnnou kvantitativní. Pokud se jedná o zkoumání pouze jednoho faktoru, mluvíme o jednofaktorové analýze rozptylu. Celý soubor je rozdělen do požadovaných skupin a zkoumá se shoda středních hodnot těchto skupin. Faktor tak následně nabývá libovolného množství hodnot. Hypotéza je pak ve tvaru  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$  [34]

Podle tohoto tvaru nejsou sledované proměnné závislé na úrovni faktoru, tudíž by měly nabývat podobných hodnot s podmínkou, že rozdíly jsou zapříčiněny pouze náhodným kolísáním. Podstatou analýzy rozptylu je rozklad rozptylu na dvě části tzv. meziskupinové a vnitroskupinové. Rozptyl meziskupinové části je zapříčiněn skutečnou rozdílností jednotlivých skupin, zatímco rozptyl vnitroskupinové (reziduální) části vzniká v důsledku náhodného kolísání. Následně se tyto složky navzájem porovnávají a v případě dostatečně velkého rozdílu směřuje test k zamítnutí hypotézy o rovnosti středních hodnot. [34]

Pro následné vyhodnocení byl použit software STATISTICA.

### 5.6.1 Hodnocení parametru Rt

Jedním z prvotních kroků je určení významnosti modelu zkoumaného parametru Rt. Cílem je dosáhnout hladiny významnosti ( $p$ ) pod 5%.

Dependent Variable	Test of SS Whole Model vs. SS Residual										
	Multiple R	Multiple R2	Adjusted R2	SS Model	df Model	MS Model	SS Residual	df Residual	MS Residual	F	p
Rt	0,585987	0,343381	0,237770	5192,654	23	225,7675	9929,499	143	69,43706	3,251399	<b>0,000009</b>

Tabulka 14 - Tabulka významnosti modelu zkoumaného parametru Rt

Z tabulky číslo 14 vidíme, že dosáhnutá hladina významnosti je  $p = 0,000009$ , což je menší než námi zvolená hladina významnosti 5%. Z toho je možné usoudit, že sledovaná proměnná Rt je závislá na změně úrovně faktoru. To znamená, že zamítneme  $H_0$  a alespoň jedna rovnost neplatí. Existuje tedy alespoň jeden faktor, který významně ovlivňuje změnu hodnoty Rt.

Effect	Univariate Tests of Significance for Rt Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
<b>Intercept</b>	<b>25086,05</b>	<b>1</b>	<b>25086,05</b>	<b>361,2776</b>	<b>0,000000</b>
Řezná rychlost	197,01	3	65,67	0,9458	0,420334
<b>Úhel čela</b>	<b>930,99</b>	<b>2</b>	<b>465,49</b>	<b>6,7038</b>	<b>0,001648</b>
Hloubka řezu	141,38	1	141,38	2,0361	0,155785
<b>Řezná rychlost * úhel čela</b>	<b>1340,79</b>	<b>6</b>	<b>223,47</b>	<b>3,2182</b>	<b>0,005389</b>
<b>Řezná rychlost * hloubka řezu</b>	<b>1024,39</b>	<b>3</b>	<b>341,46</b>	<b>4,9176</b>	<b>0,002787</b>
Úhel čela * hloubka řezu	201,42	2	100,71	1,4504	0,237911
<b>Řezná rychlost*úhel čela *hloubka řezu</b>	<b>1332,30</b>	<b>6</b>	<b>222,05</b>	<b>3,1979</b>	<b>0,005631</b>
Error	9929,50	143	69,44		

Tabulka 15 - Vliv faktorů na zkoumaném parametru Rt

Z této tabulky je zřejmé, že parametr Rt je významně ovlivněn změnou úhlu čela, interakcí řezné rychlosti a úhlu čela, interakcí řezné rychlosti a hloubky řezu a interakcí řezné rychlosti, úhlu čela a hloubky řezu.

Tabulka číslo 16 představuje základní popis hodnoty Rt pro jednotlivé faktory a jejich interakce. Mimo úrovně faktorů tabulka obsahuje hodnoty aritmetického průměru, směrodatnou odchylku, střední chybu průměru, horní a dolní interval 95% spolehlivosti pro střední hodnotu Rt.

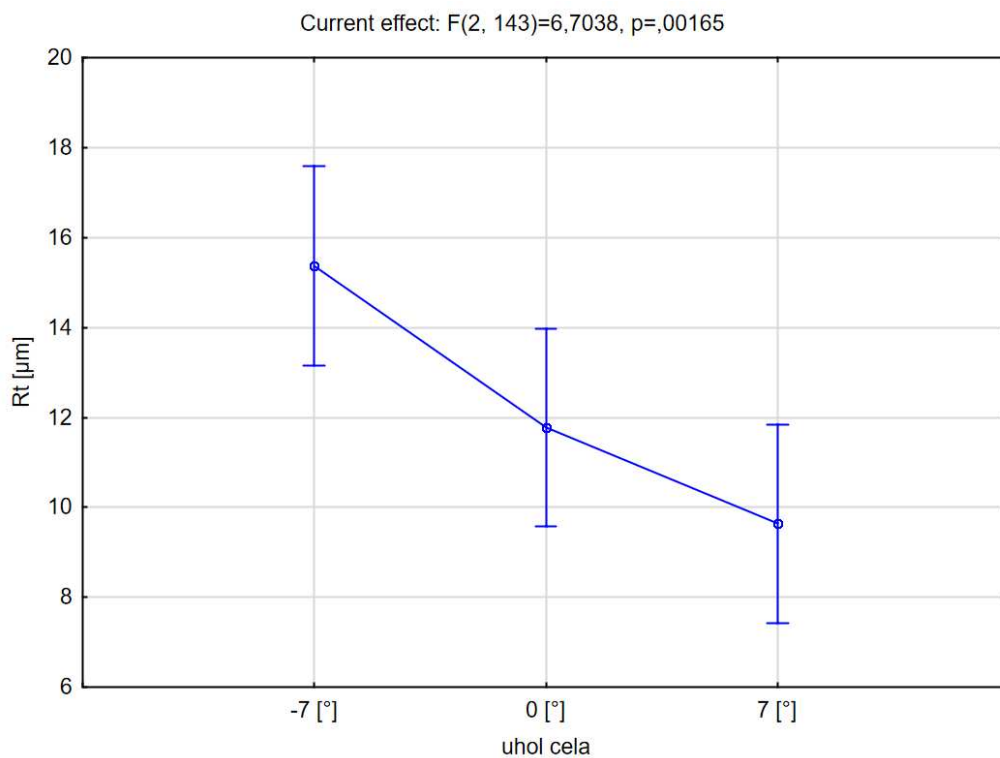
Effect	Descriptive Statistics								
	Level of Factor	Level of Factor	Level of Factor	N	Rt Mean	Rt Std.Dev.	Rt Std.Err	Rt -95,00%	Rt +95,00%
Total				167	12,29808	9,54449	0,738575	10,83987	13,75629
Řezný rychlost	33 [m.min-1]			42	14,03833	11,43168	1,763947	10,47597	17,60070
Řezný rychlost	47 [m.min-1]			42	11,85357	9,36939	1,445728	8,93387	14,77328
Řezný rychlost	65,5 [m.min-1]			41	11,21122	7,46981	1,166589	8,85346	13,56898
Řezný rychlost	92 [m.min-1]			42	12,06333	9,55953	1,475067	9,08437	15,04229
Úhel čela	-7 [°]			55	15,53891	11,72772	1,581366	12,36846	18,70936
Úhel čela	0 [°]			56	11,78054	9,19913	1,229286	9,31699	14,24408
Úhel čela	7 [°]			56	9,63268	6,10542	0,815871	7,99764	11,26772
Hloubka řezu	0,1 [mm]			84	11,34155	6,56530	0,716332	9,91679	12,76630
Hloubka řezu	0,3 [mm]			83	13,26614	11,78567	1,293645	10,69267	15,83962
Řezná rychlost * úhel čela	33 [m.min-1]	-7 [°]		14	19,14714	15,03963	4,019511	10,46352	27,83077
Řezná rychlost * úhel čela	33 [m.min-1]	0 [°]		14	12,59214	10,17442	2,719227	6,71761	18,46668
Řezná rychlost * úhel čela	33 [m.min-1]	7 [°]		14	10,37571	6,13509	1,639671	6,83342	13,91801
Řezná rychlost * úhel čela	47 [m.min-1]	-7 [°]		14	14,94714	9,68369	2,588074	9,35595	20,53834
Řezná rychlost * úhel čela	47 [m.min-1]	0 [°]		14	14,01714	10,72601	2,866648	7,82413	20,21016
Řezná rychlost * úhel čela	47 [m.min-1]	7 [°]		14	6,59643	4,78847	1,279773	3,83165	9,36121
Řezná rychlost * úhel čela	65,5 [m.min-1]	-7 [°]		13	9,29692	5,66314	1,570674	5,87472	12,71913
Řezná rychlost * úhel čela	65,5 [m.min-1]	0 [°]		14	13,87714	9,44063	2,523115	8,42628	19,32800
Řezná rychlost * úhel čela	65,5 [m.min-1]	7 [°]		14	10,32286	6,38658	1,706885	6,63536	14,01036
Řezná rychlost * úhel čela	92 [m.min-1]	-7 [°]		14	18,31857	12,65181	3,381339	11,01363	25,62351
Řezná rychlost * úhel čela	92 [m.min-1]	0 [°]		14	6,63571	3,31623	0,886299	4,72098	8,55045
Řezná rychlost * úhel čela	92 [m.min-1]	7 [°]		14	11,23571	6,52278	1,743287	7,46957	15,00186
Řezná rychlost * hloubka řezu	33 [m.min-1]	0,1 [mm]		21	10,51571	5,09808	1,112492	8,19510	12,83633
Řezná rychlost * hloubka řezu	33 [m.min-1]	0,3 [mm]		21	17,56095	14,69190	3,206036	10,87328	24,24863
Řezná rychlost * hloubka řezu	47 [m.min-1]	0,1 [mm]		21	8,62905	4,67244	1,019611	6,50218	10,75592
Řezná rychlost * hloubka řezu	47 [m.min-1]	0,3 [mm]		21	15,07810	11,67448	2,547580	9,76394	20,39225
Řezná rychlost * hloubka řezu	65,5 [m.min-1]	0,1 [mm]		21	13,13286	8,49052	1,852783	9,26802	16,99770
Řezná rychlost * hloubka řezu	65,5 [m.min-1]	0,3 [mm]		20	9,19350	5,76365	1,288792	6,49603	11,89097
Řezná rychlost * hloubka řezu	92 [m.min-1]	0,1 [mm]		21	13,08857	6,62958	1,446692	10,07082	16,10632
Řezná rychlost * hloubka řezu	92 [m.min-1]	0,3 [mm]		21	11,03810	11,88191	2,592846	5,62951	16,44668
Úhel čela * hloubka řezu	-7 [°]	0,1 [mm]		28	13,05250	6,57932	1,243374	10,50131	15,60369
Úhel čela * hloubka řezu	-7 [°]	0,3 [mm]		27	18,11741	15,07131	2,900476	12,15539	24,07942
Úhel čela * hloubka řezu	0 [°]	0,1 [mm]		28	10,96964	7,50991	1,419239	8,05761	13,88168
Úhel čela * hloubka řezu	0 [°]	0,3 [mm]		28	12,59143	10,70606	2,023256	8,44005	16,74281
Úhel čela * hloubka řezu	7 [°]	0,1 [mm]		28	10,00250	5,27042	0,996016	7,95884	12,04616
Úhel čela * hloubka řezu	7 [°]	0,3 [mm]		28	9,26286	6,91895	1,307559	6,57997	11,94575
Řezná rychlost * úhel čela * hl. řezu	33 [m.min-1]	-7 [°]	0,1 [mm]	7	13,43286	6,09903	2,305215	7,79220	19,07352
Řezná rychlost * úhel čela * hl. řezu	33 [m.min-1]	-7 [°]	0,3 [mm]	7	24,86143	19,40853	7,335733	6,91154	42,81132
Řezná rychlost * úhel čela * hl. řezu	33 [m.min-1]	0 [°]	0,1 [mm]	7	8,18429	4,95015	1,870981	3,60616	12,76241
Řezná rychlost * úhel čela * hl. řezu	33 [m.min-1]	0 [°]	0,3 [mm]	7	17,00000	12,42787	4,697292	5,50614	28,49386
Řezná rychlost * úhel čela * hl. řezu	33 [m.min-1]	7 [°]	0,1 [mm]	7	9,93000	2,87450	1,086460	7,27153	12,58847
Řezná rychlost * úhel čela * hl. řezu	33 [m.min-1]	7 [°]	0,3 [mm]	7	10,82143	8,53379	3,225468	2,92899	18,71386
Řezná rychlost * úhel čela * hl. řezu	47 [m.min-1]	-7 [°]	0,1 [mm]	7	11,56429	4,52238	1,709299	7,38178	15,74679
Řezná rychlost * úhel čela * hl. řezu	47 [m.min-1]	-7 [°]	0,3 [mm]	7	18,33000	12,49090	4,721117	6,77784	29,88216
Řezná rychlost * úhel čela * hl. řezu	47 [m.min-1]	0 [°]	0,1 [mm]	7	7,21286	2,13584	0,807273	5,23753	9,18818
Řezná rychlost * úhel čela * hl. řezu	47 [m.min-1]	0 [°]	0,3 [mm]	7	20,82143	11,69094	4,418761	10,00911	31,63375



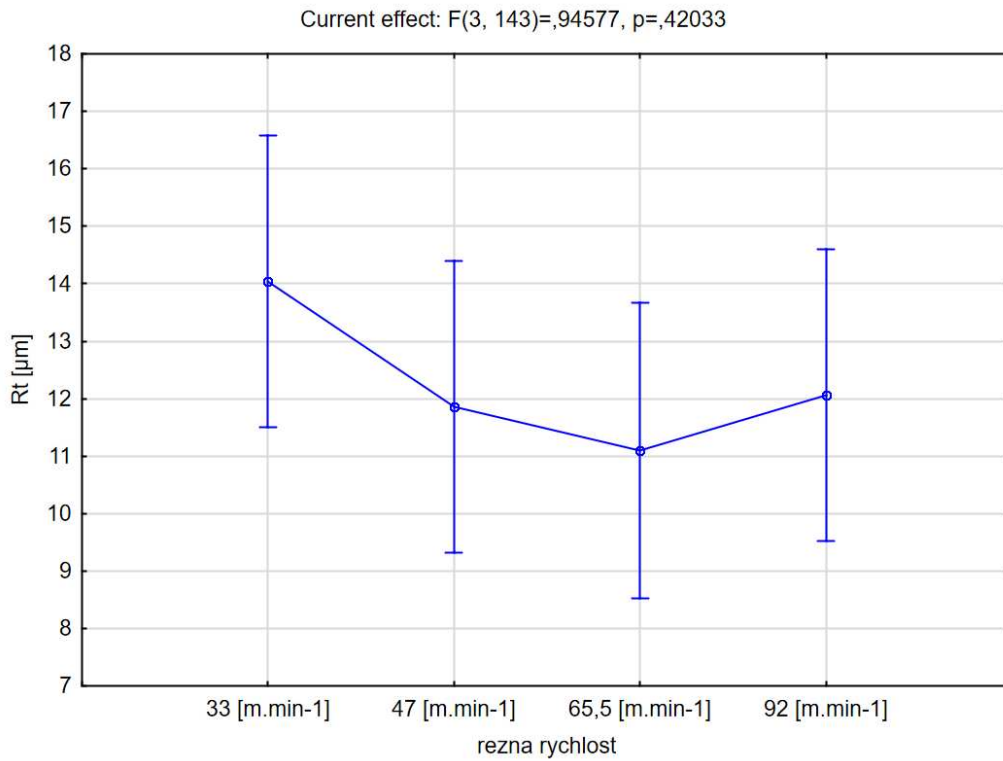
Řezná rychlost * úhel čela * hl. řezu	47 [m.min-1]	7 [°]	0,1 [mm]	7	7,11000	5,71622	2,160527	1,82338	12,39662
Řezná rychlost * úhel čela * hl. řezu	47 [m.min-1]	7 [°]	0,3 [mm]	7	6,08286	4,04845	1,530171	2,33866	9,82705
Řezná rychlost * úhel čela * hl. řezu	65,5 [m.min-1]	-7 [°]	0,1 [mm]	7	11,90857	6,71327	2,537379	5,69983	18,11731
Řezná rychlost * úhel čela * hl. řezu	65,5 [m.min-1]	-7 [°]	0,3 [mm]	6	6,25000	1,48316	0,605497	4,69352	7,80648
Řezná rychlost * úhel čela * hl. řezu	65,5 [m.min-1]	0 [°]	0,1 [mm]	7	19,99286	9,42832	3,563571	11,27311	28,71260
Řezná rychlost * úhel čela * hl. řezu	65,5 [m.min-1]	0 [°]	0,3 [mm]	7	7,76143	4,11593	1,555674	3,95483	11,56803
Řezná rychlost * úhel čela * hl. řezu	65,5 [m.min-1]	7 [°]	0,1 [mm]	7	7,49714	3,55369	1,343167	4,21053	10,78376
Řezná rychlost * úhel čela * hl. řezu	65,5 [m.min-1]	7 [°]	0,3 [mm]	7	13,14857	7,55746	2,856453	6,15908	20,13806
Řezná rychlost * úhel čela * hl. řezu	92 [m.min-1]	-7 [°]	0,1 [mm]	7	15,30429	9,04877	3,420115	6,93556	23,67301
Řezná rychlost * úhel čela * hl. řezu	92 [m.min-1]	-7 [°]	0,3 [mm]	7	21,33286	15,61198	5,900773	6,89419	35,77153
Řezná rychlost * úhel čela * hl. řezu	92 [m.min-1]	0 [°]	0,1 [mm]	7	8,48857	2,85453	1,078909	5,84858	11,12857
Řezná rychlost * úhel čela * hl. řezu	92 [m.min-1]	0 [°]	0,3 [mm]	7	4,78286	2,76926	1,046681	2,22172	7,34399
Řezná rychlost * úhel čela * hl. řezu	92 [m.min-1]	7 [°]	0,1 [mm]	7	15,47286	4,40784	1,666006	11,39629	19,54943
Řezná rychlost * úhel čela * hl. řezu	92 [m.min-1]	7 [°]	0,3 [mm]	7	6,99857	5,55556	2,099804	1,86054	12,13661

Tabulka 16 - Deskriptivní statistika parametru Rt podle jednotlivých proměnných

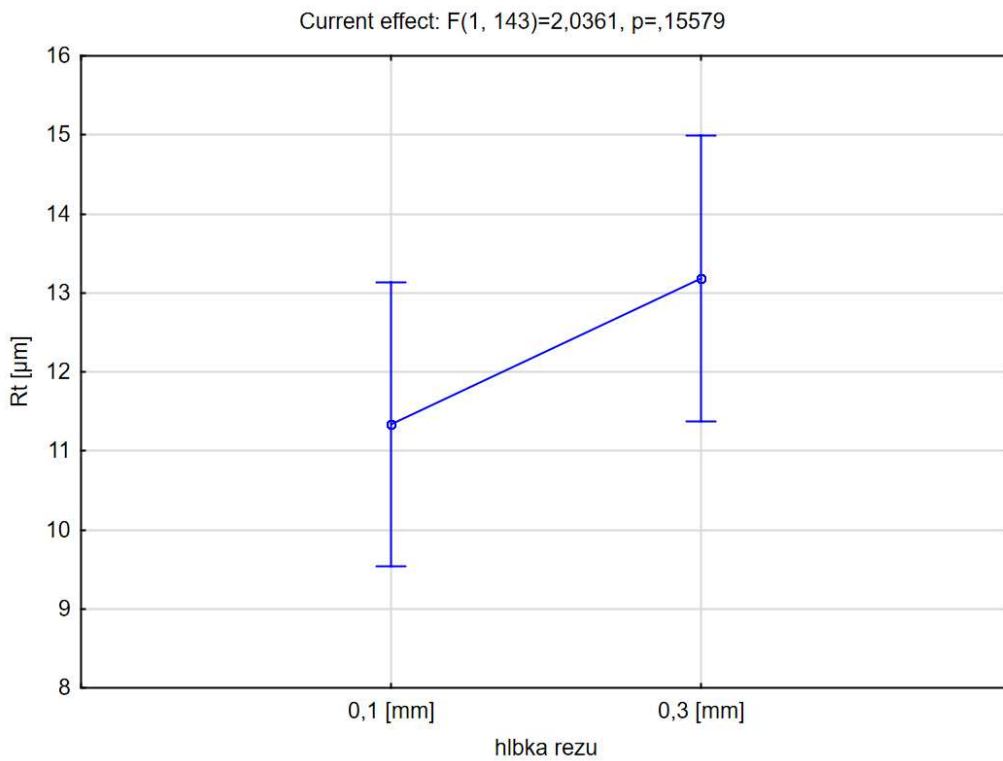
Níže uvedené grafy představují závislost hodnoty parametru Rt v závislosti na změně úhlu čela, řezné rychlosti, hloubky řezu a jejich interakci.



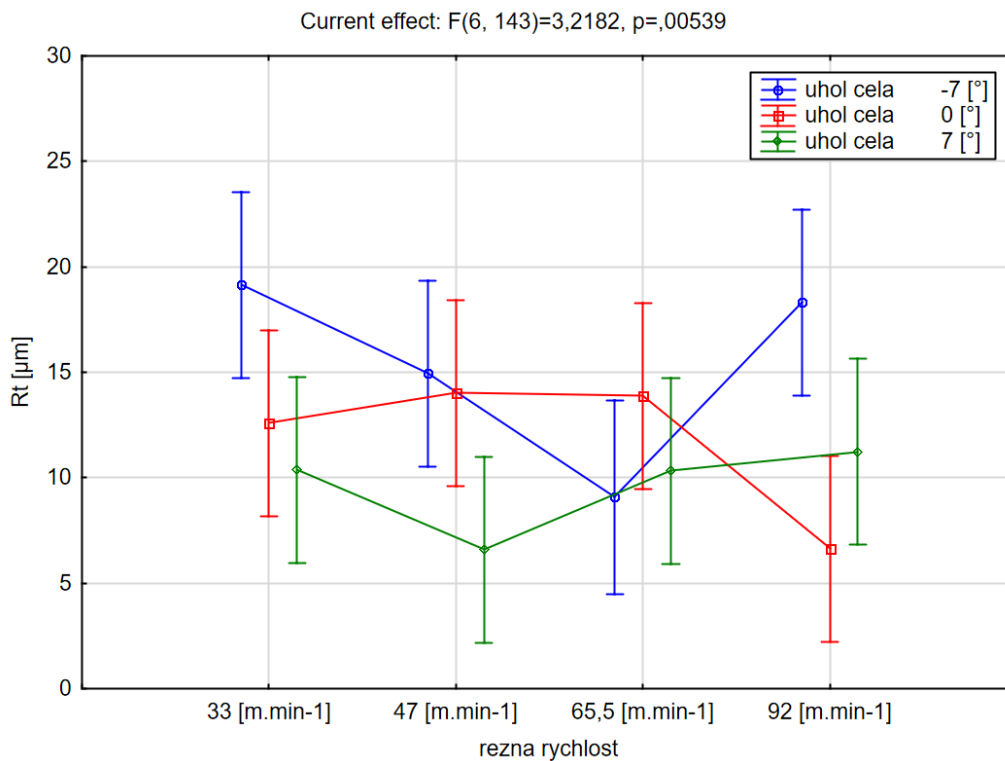
Graf 17 - Vliv nastavení úhlu čela na parametr drsnosti Rt



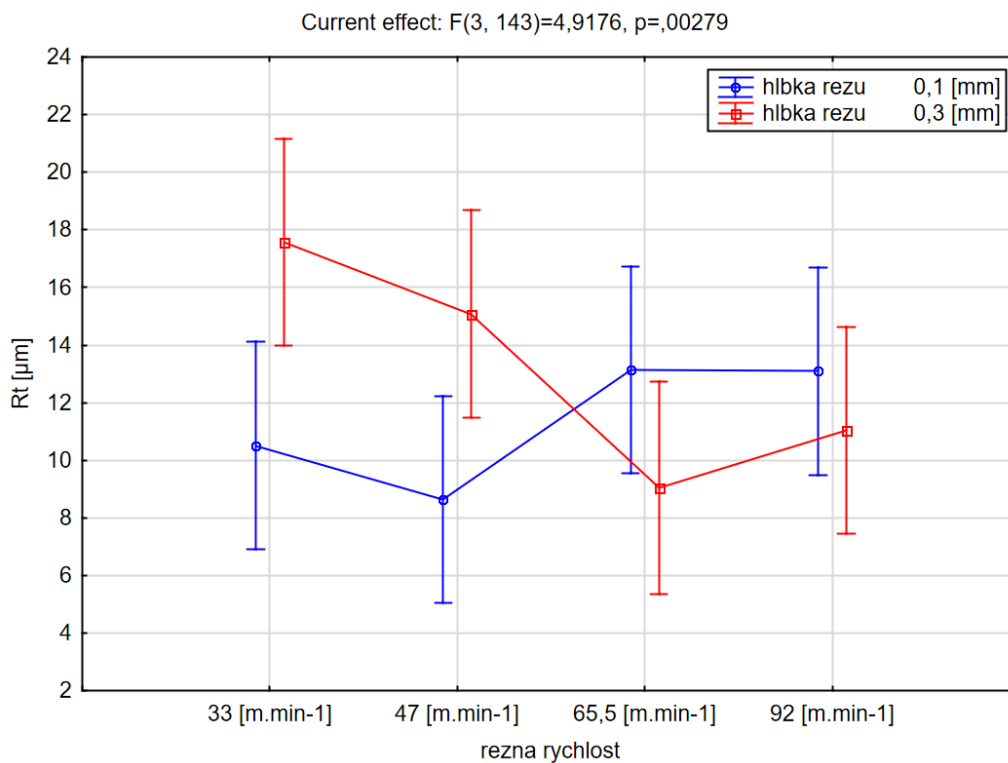
**Graf 18 - Vliv řezné rychlosti na parametr drsnosti Rt**



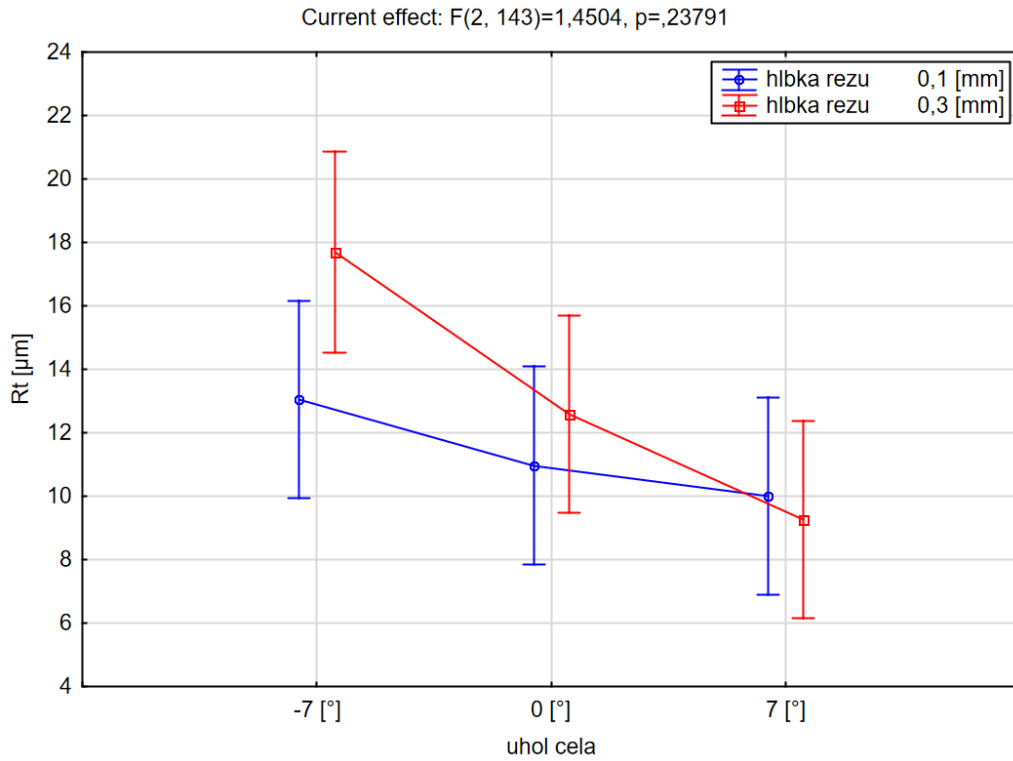
**Graf 19 - Vliv hloubky řezu na parametr drsnosti Rt**



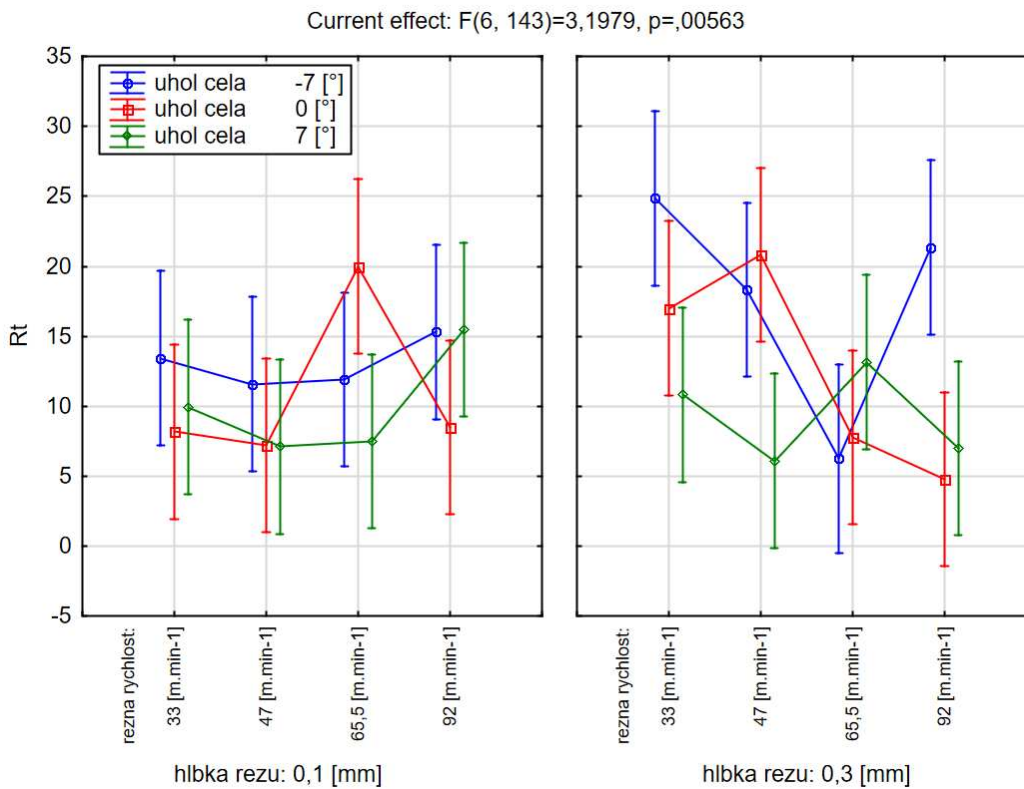
Graf 20 - Vliv nastavení úhlu čela a řezné rychlosti na parametr drsnosti Rt



Graf 21 - Vliv řezné rychlosti a hloubky řezu na parametr drsnosti Rt



Graf 22 - Vliv nastavení úhlu čela a hloubky řezu na parametr drsnosti Rt



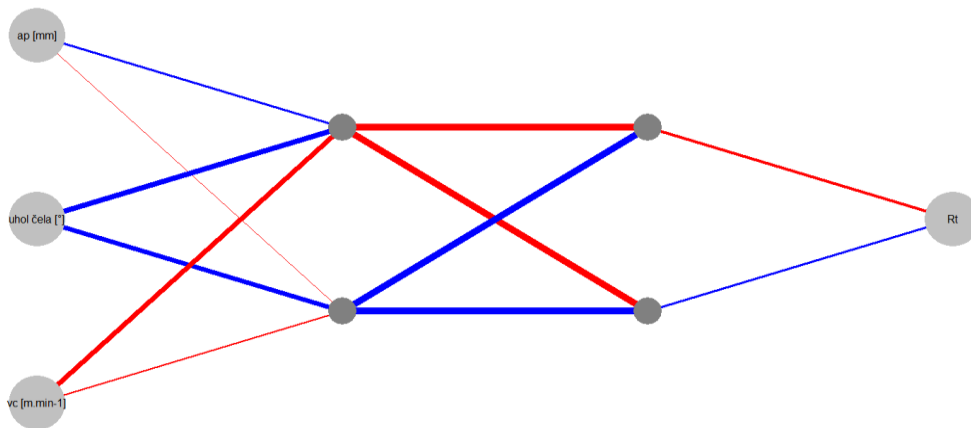
Graf 23 - Vliv nastavení úhlu čela, hloubky řezu a řezné rychlosti na parametr Rt

Na grafu číslo 23 jsou zaznamenány všechny možné kombinace změn hloubky řezu, řezné rychlosti a nastavení úhlu čela na drsnosti obrobeneho povrchu  $R_t$ .

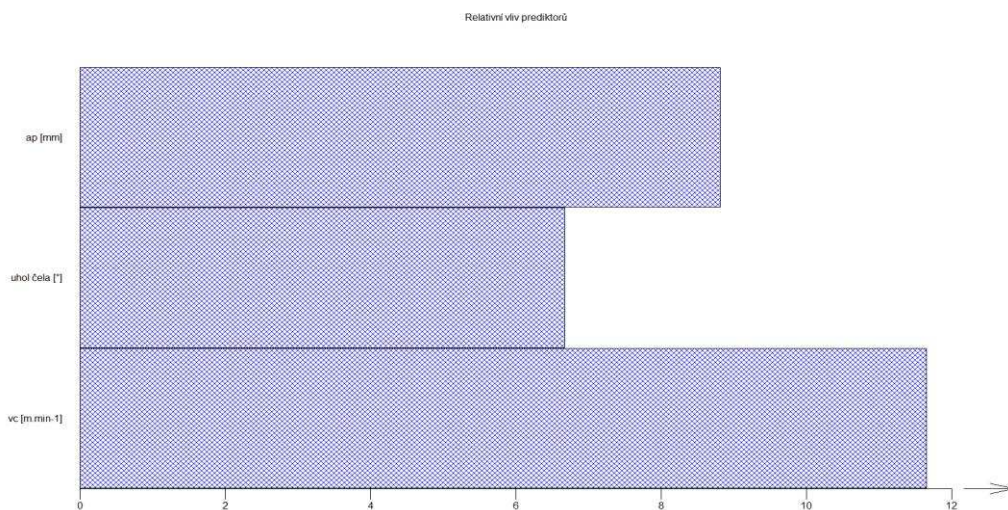
Protože z modelu nelze určit velikost vlivů hlavních faktorů, využijeme pro získání těchto velikostí neuronové sítě. Neuronovou síť lze považovat za algoritmus, který se inspiroval z biologických neuronů a tím napodobuje chování lidského mozku. V dnešní době se tyto sítě využívají především v umělé inteligenci, díky schopnosti se učit. Lze jimi vyhodnocovat řízení a plánování kvality, vytvářet analýzy zisku, předpovídat vývoj parametrů atd. [35]

Pomocí neuronových sítí následně zjistíme velikosti vlivů faktorů řezné rychlosti, nastavení úhlu čela a hloubky řezu. Pro vyhodnocení bude použit software QC.Expert.

Na grafu 24 je graficky vyjádřena architektura sítě. Tloušťka čáry představuje absolutní velikost odpovídajících vah a množství informací, které protékají mezi jednotlivými neurony. Barva čáry znázorňuje znaménko váhy, kde červená barva označuje zápornou hodnotu a modrá hodnotu kladnou. Graf 25 představuje relativní vliv prediktorů na predikci, který je vyjádřen jako součet absolutních vah jednotlivých proměnných. [35]



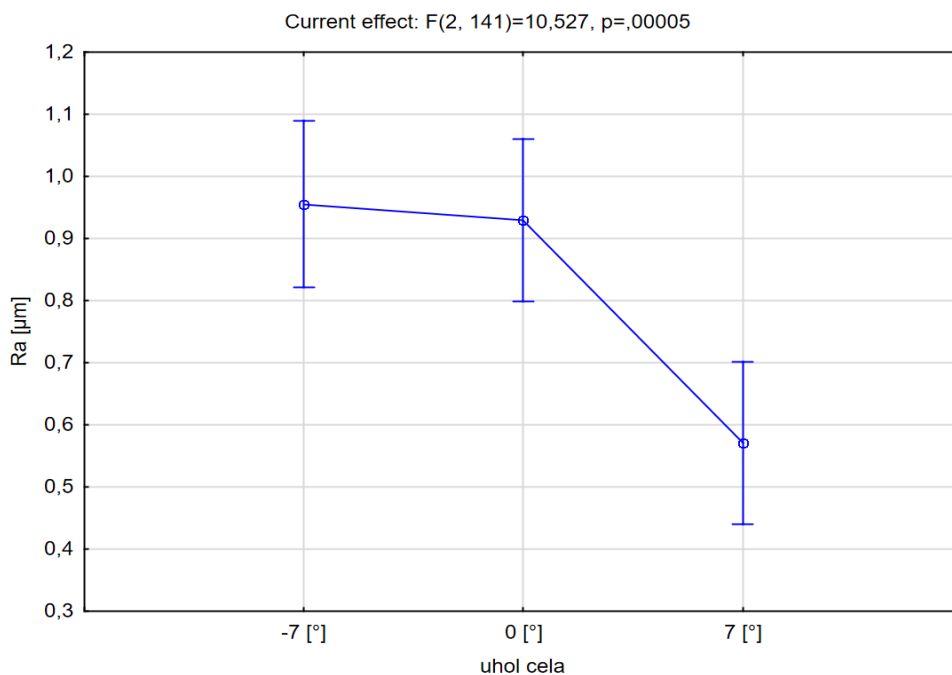
Graf 24 – Grafické vyjádření architektury sítě pro parametr  $R_t$



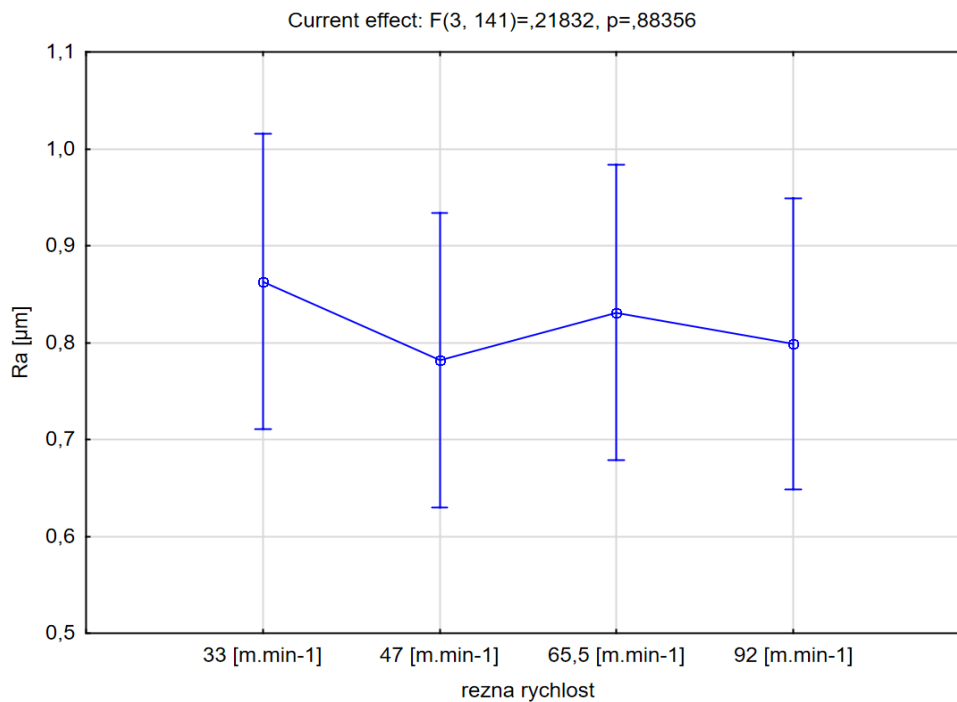
Graf 25 - Graf znázorňující relativní vliv prediktorů pro parametr  $R_t$

### 5.6.2 Hodnocení parametru Ra

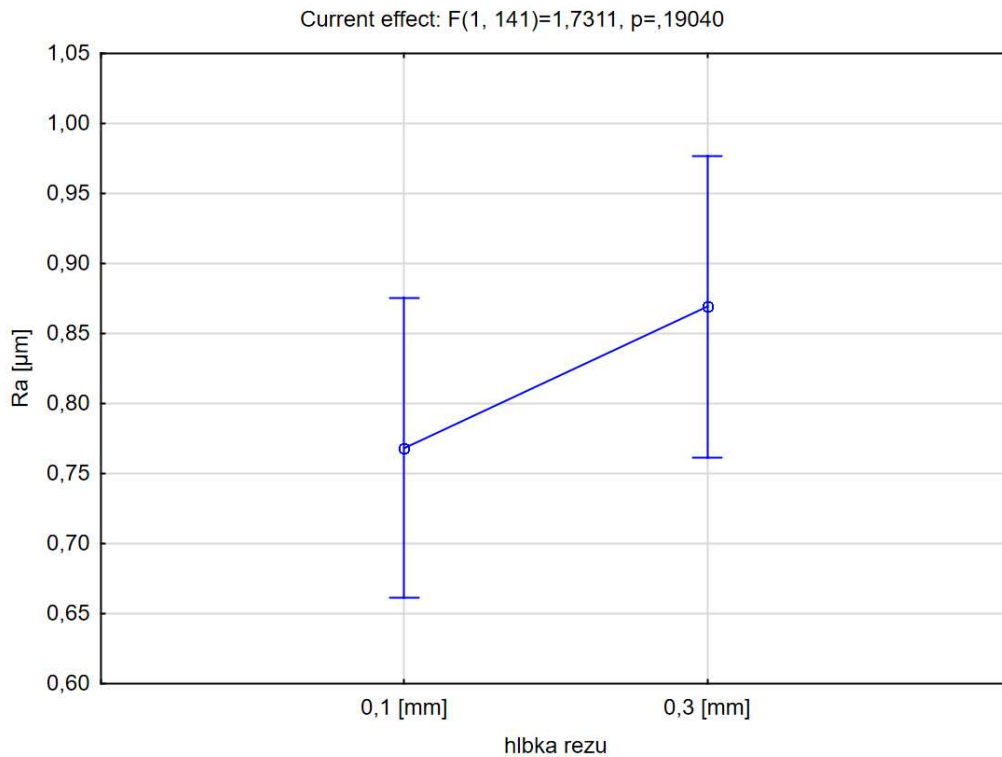
Stejným způsobem proběhl výpočet parametrů Ra, Rz a Rq. Nyní tedy budou zobrazeny jen výsledné grafy.



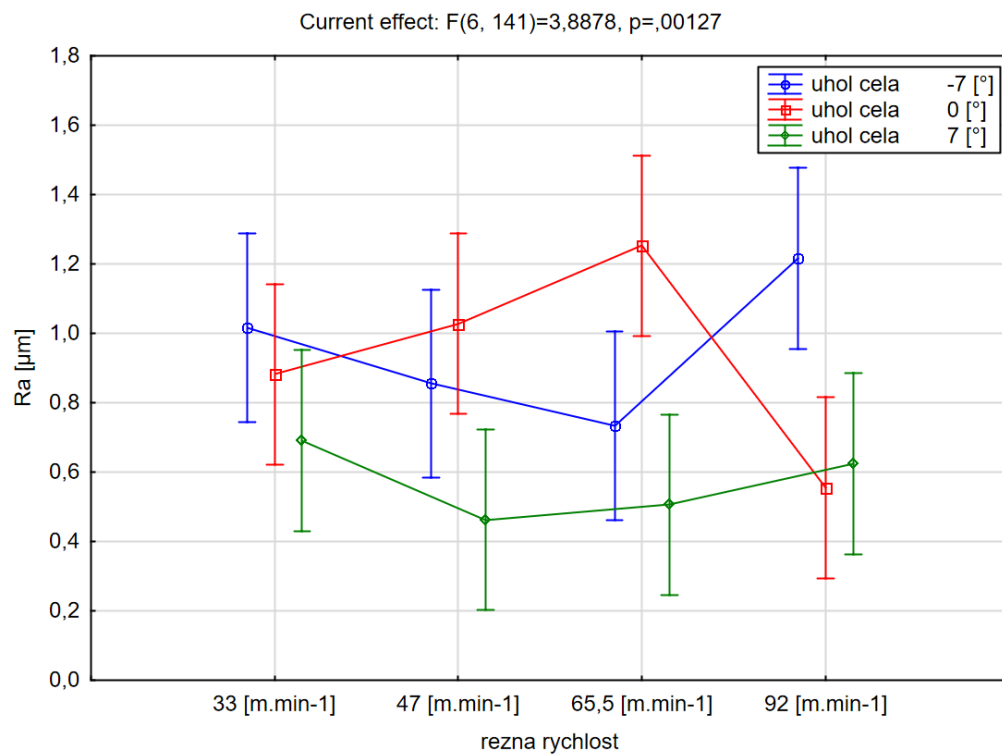
Graf 26 - Vliv nastavení úhlu čela na parametr drsnosti Ra



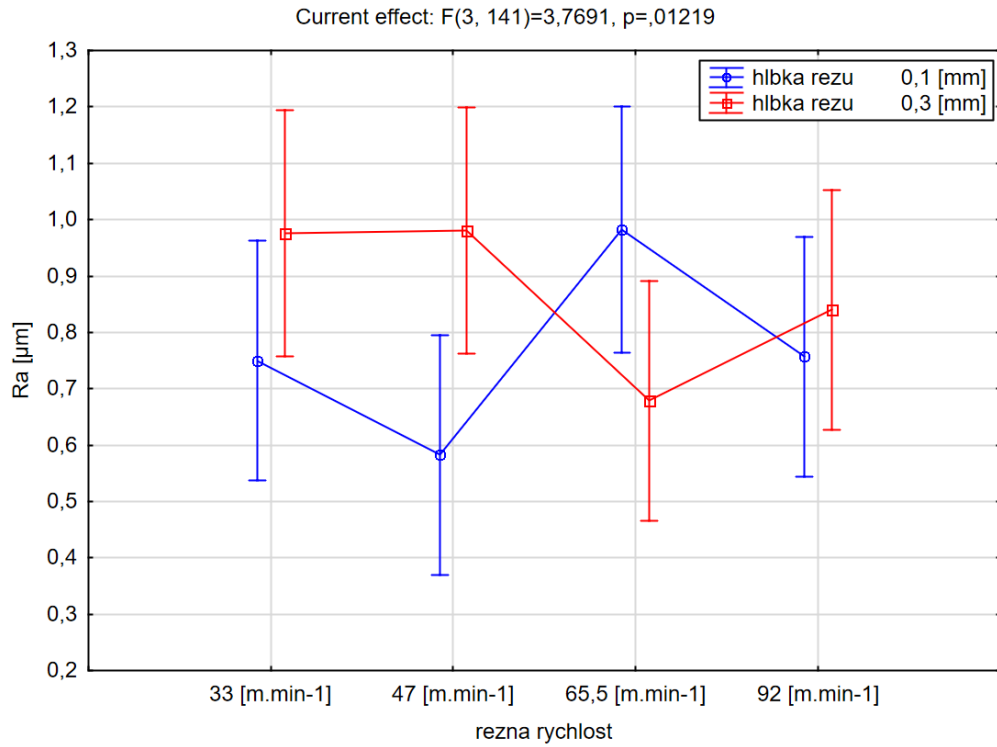
Graf 27 - Vliv řezné rychlosti na parametr drsnosti Ra



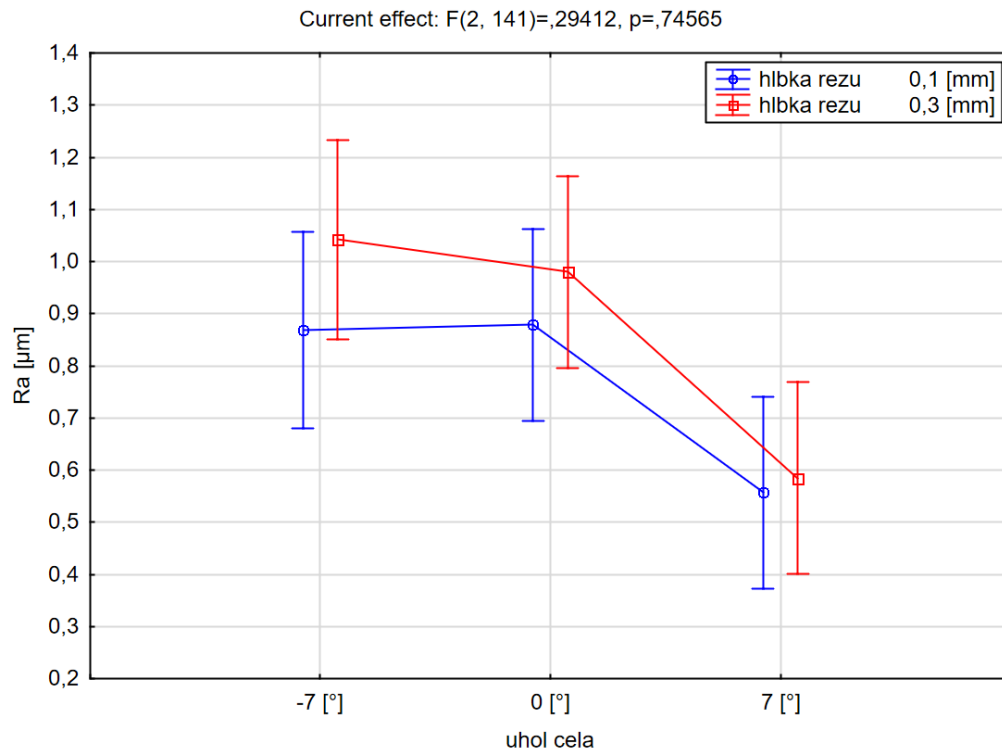
Graf 28 - Vliv hloubky řezu na parametr drsnosti Ra



Graf 29 - Vliv nastavení úhlu čela a řezné rychlosti na parametr drsnosti Ra

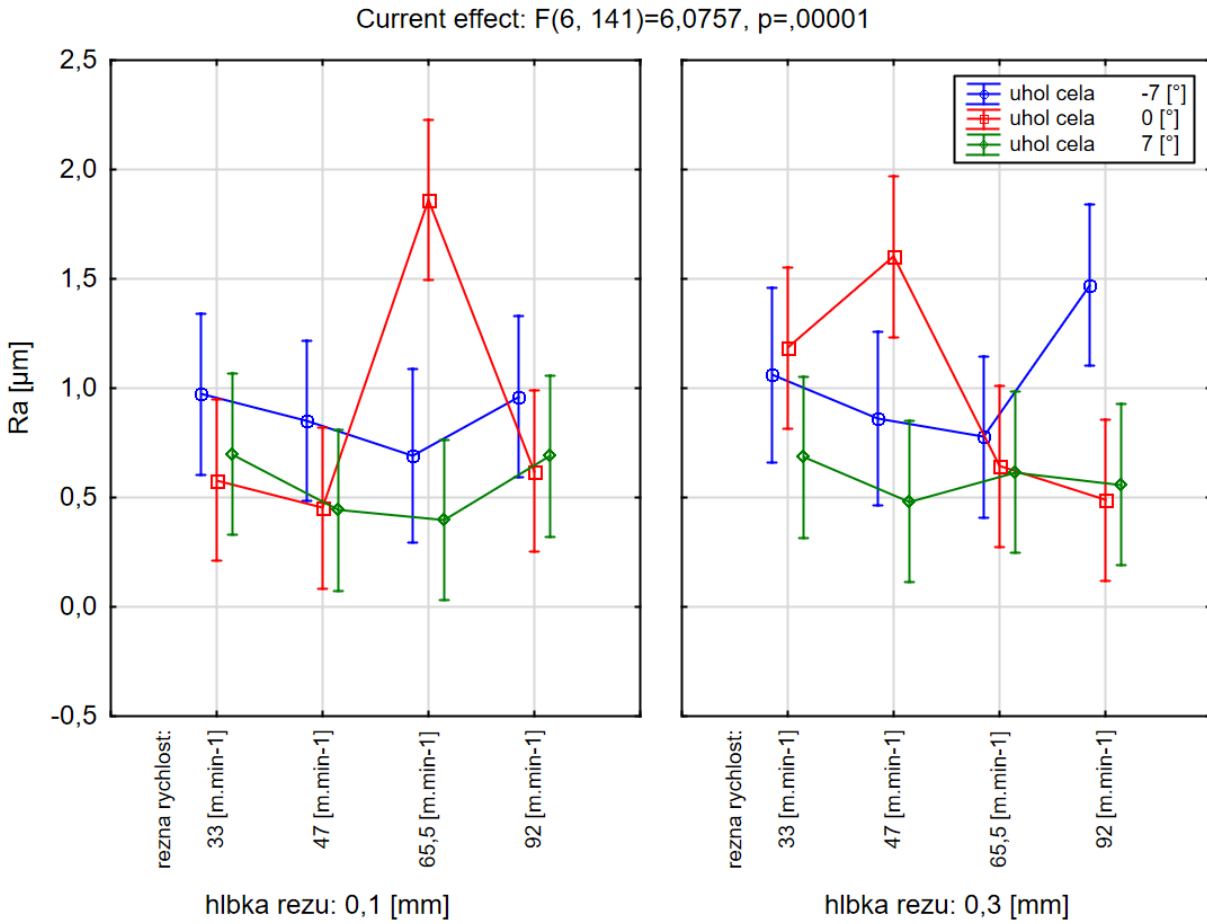


Graf 30 - Vliv řezné rychlosti a hloubky řezu na parametr drsnosti Ra

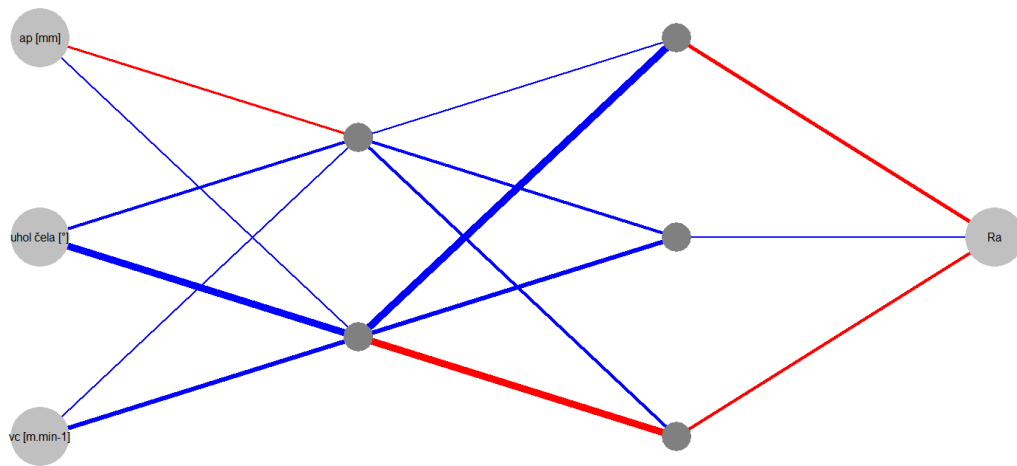


Graf 31 - Vliv nastavení úhlu čela a hloubky řezu na parametr drsnosti Ra

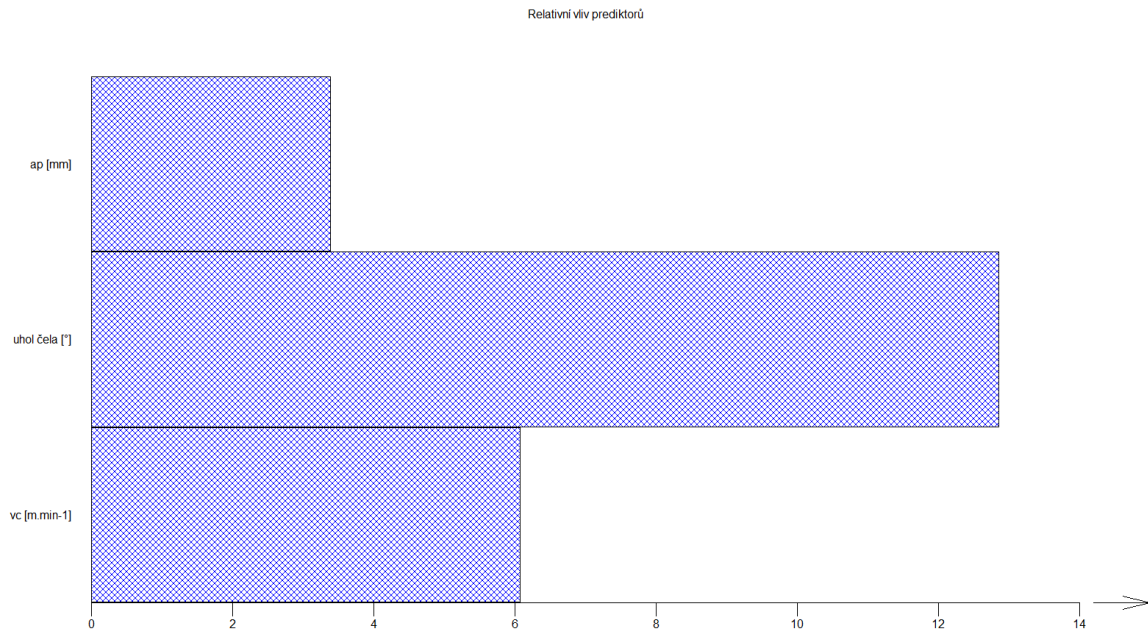




Graf 32 - Vliv nastavení úhlu čela, hloubky řezu a řezné rychlosti na parametr Ra

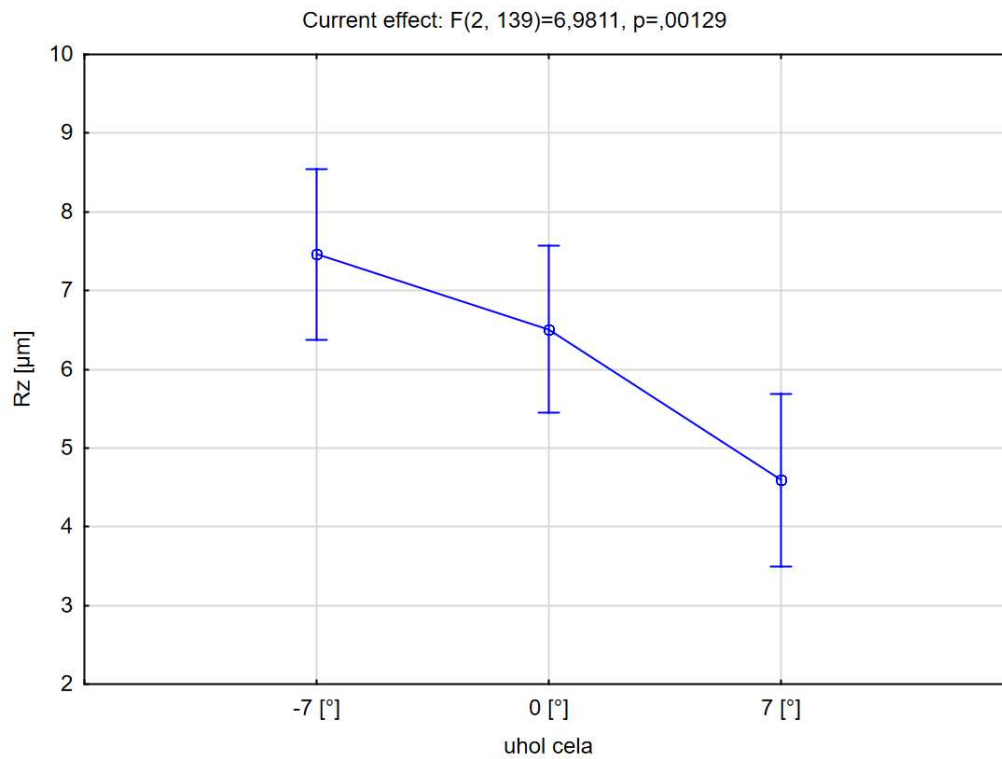


Graf 33 - Grafické vyjádření architektury sítě pro parametr Ra

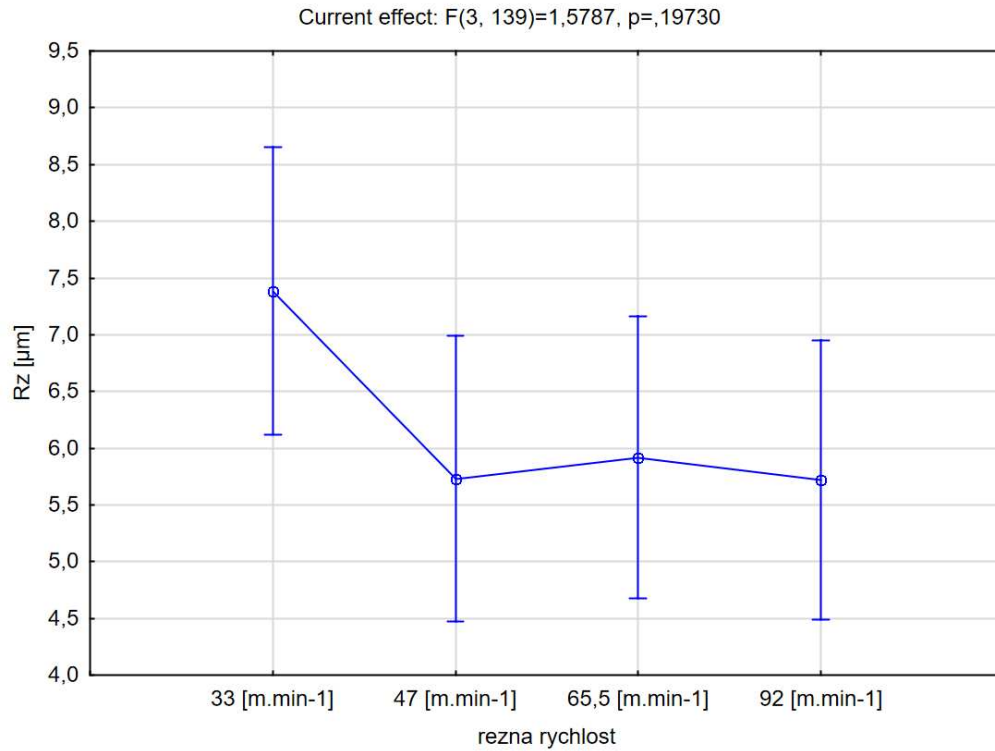


Graf 34 - Graf znázorňující relativní vliv prediktorů pro parametr Ra

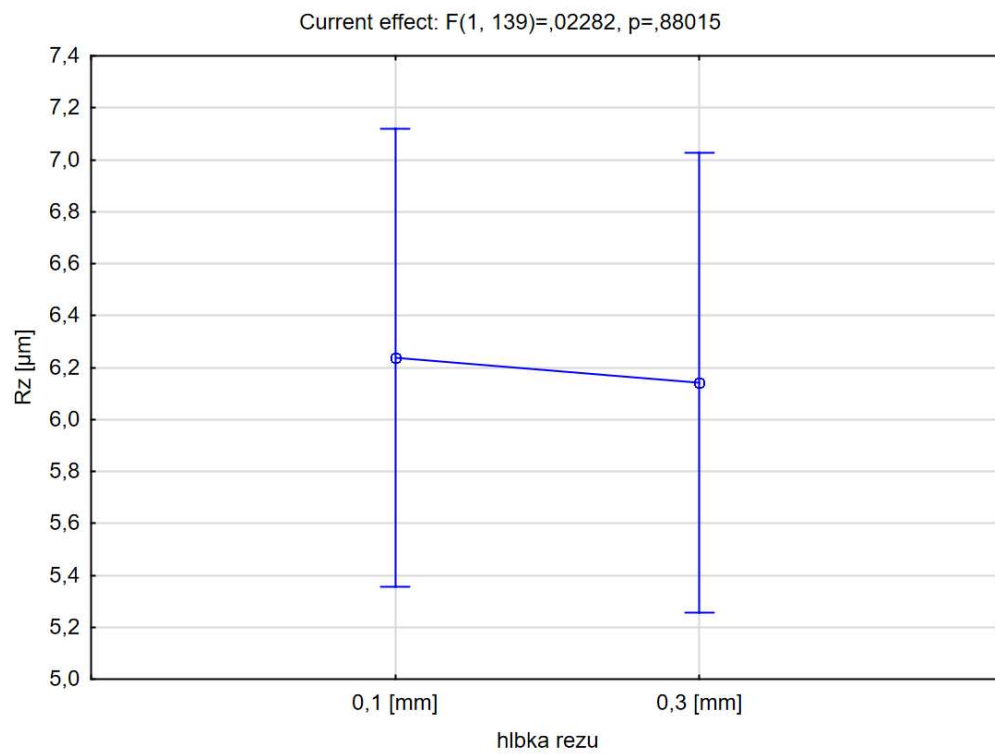
### 5.6.3 Hodnocení parametru Rz



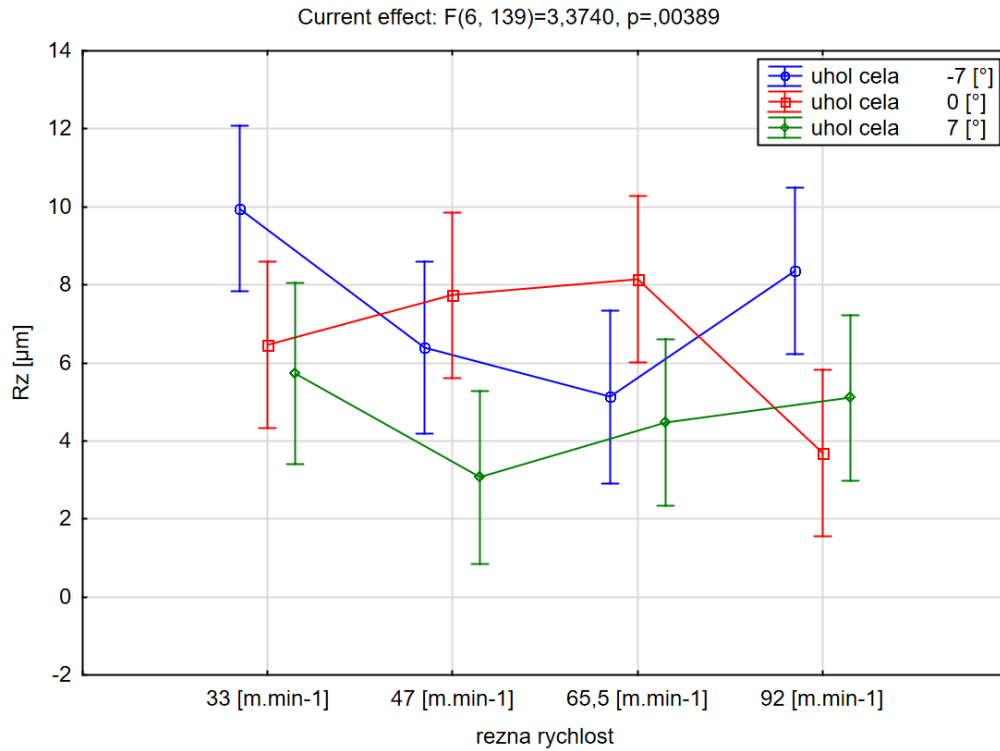
Graf 35 - Vliv nastavení úhlu čela na parametr drsnosti Rz



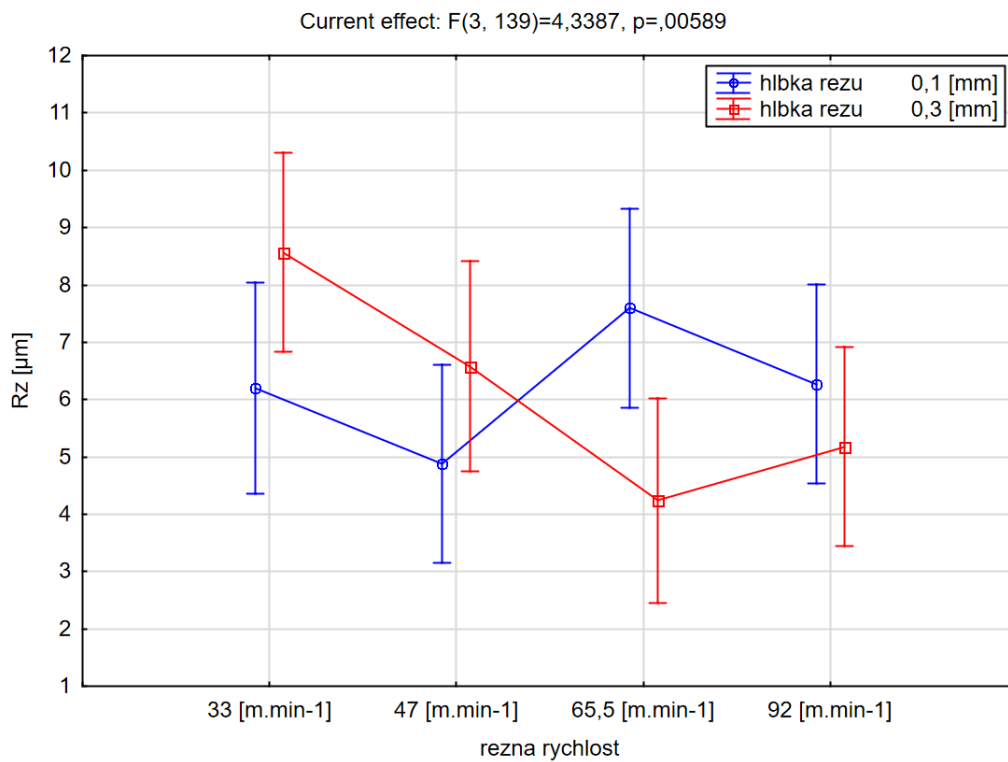
**Graf 36 - Vliv řezné rychlosti na parametr drsnosti Rz**



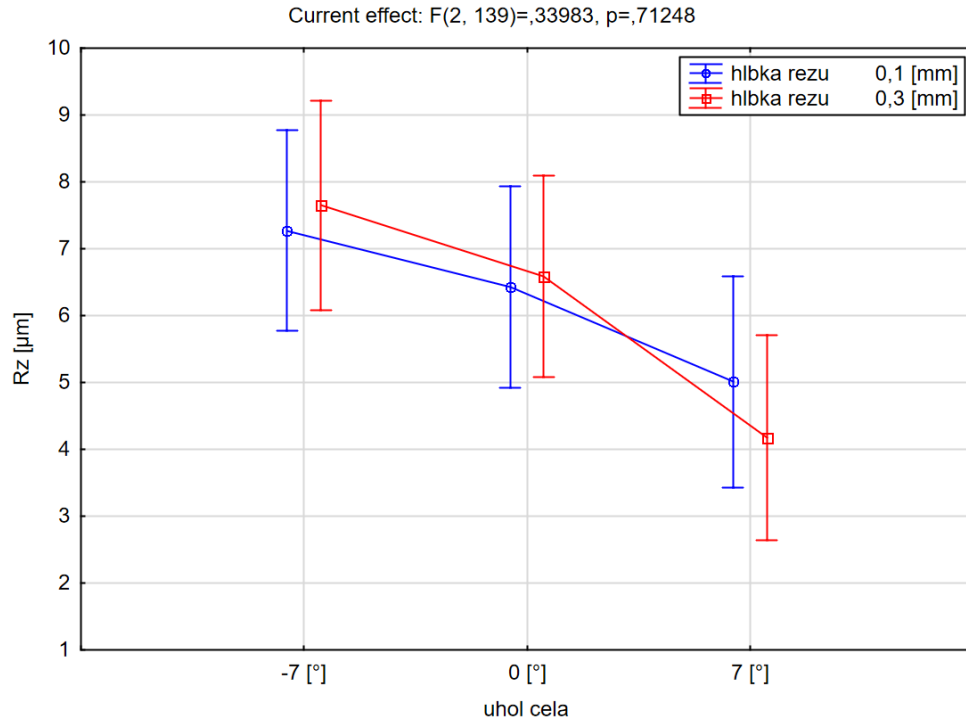
**Graf 37 - Vliv hloubky řezu na parametr drsnosti Rz**



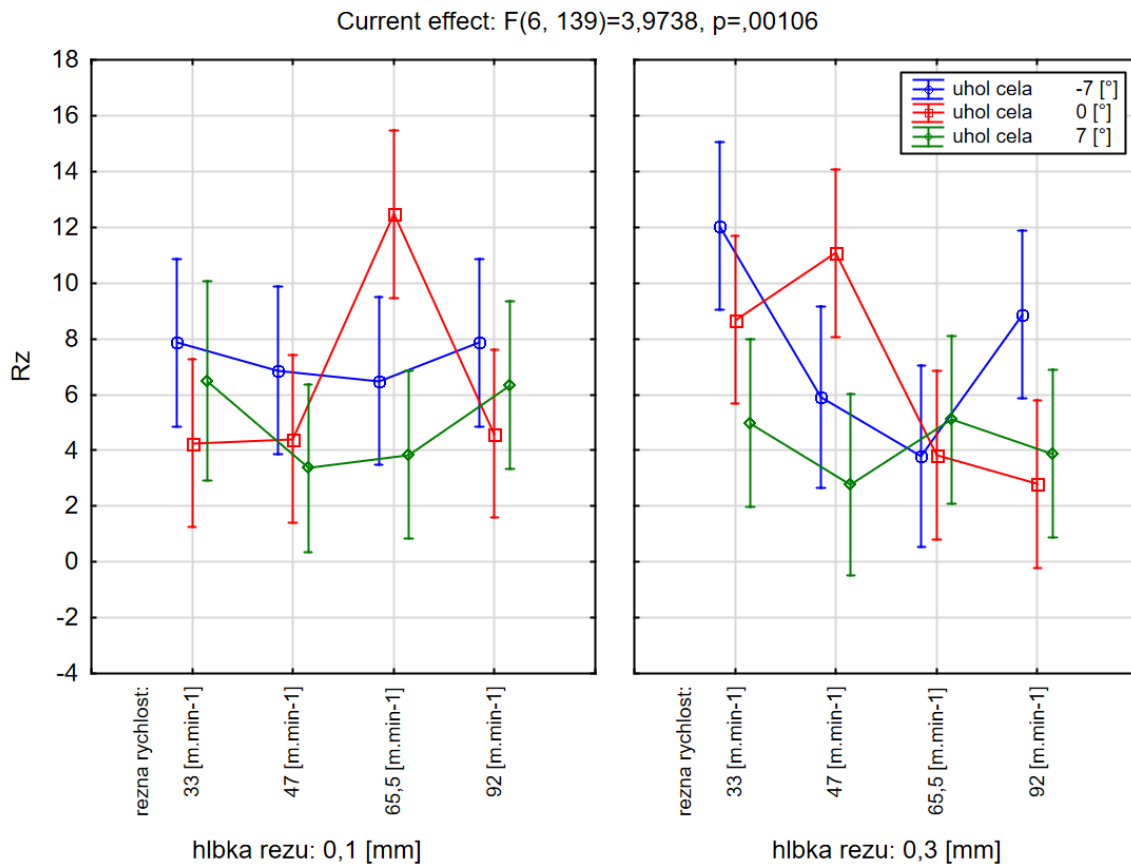
Graf 38 - Vliv nastavení úhlu čela a řezné rychlosti na parametr drsnosti Rz



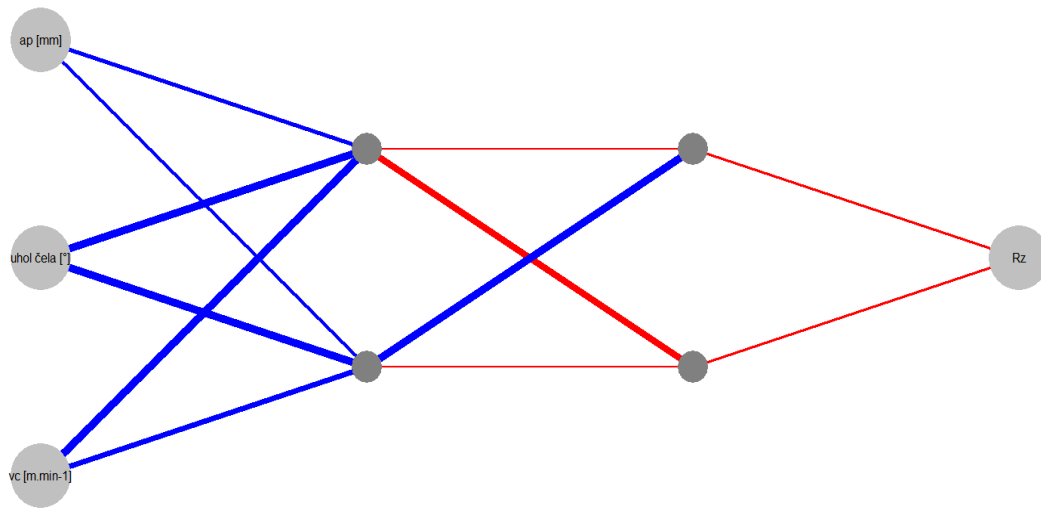
Graf 39 - Vliv řezné rychlosti a hloubky řezu na parametr drsnosti Rz



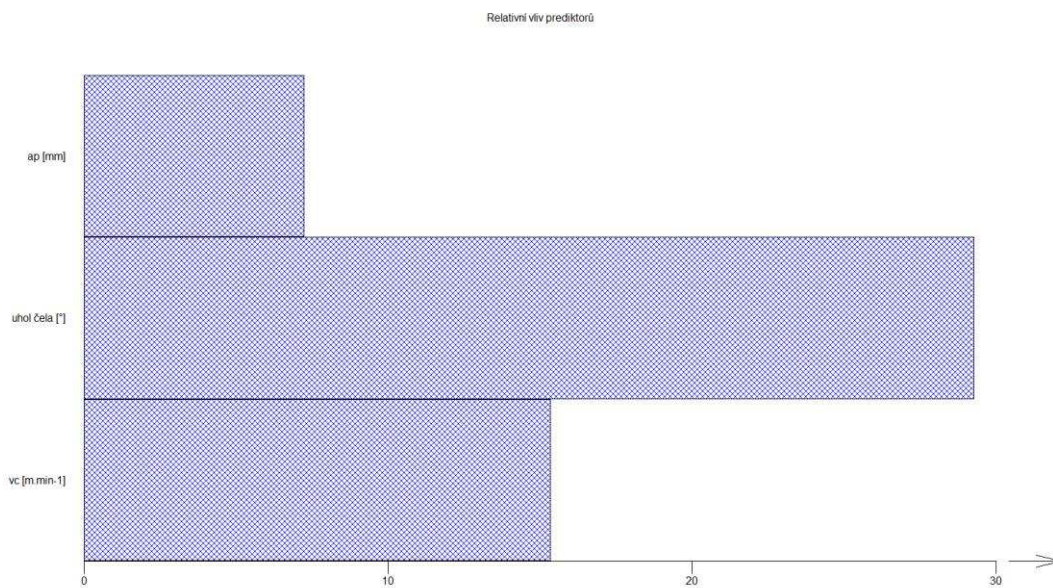
Graf 40 - Vliv nastavení úhlu čela a hloubky řezu na parametr drsnosti Rz



Graf 41 - Vliv nastavení úhlu čela, hloubky řezu a řezné rychlosti na parametr Rz

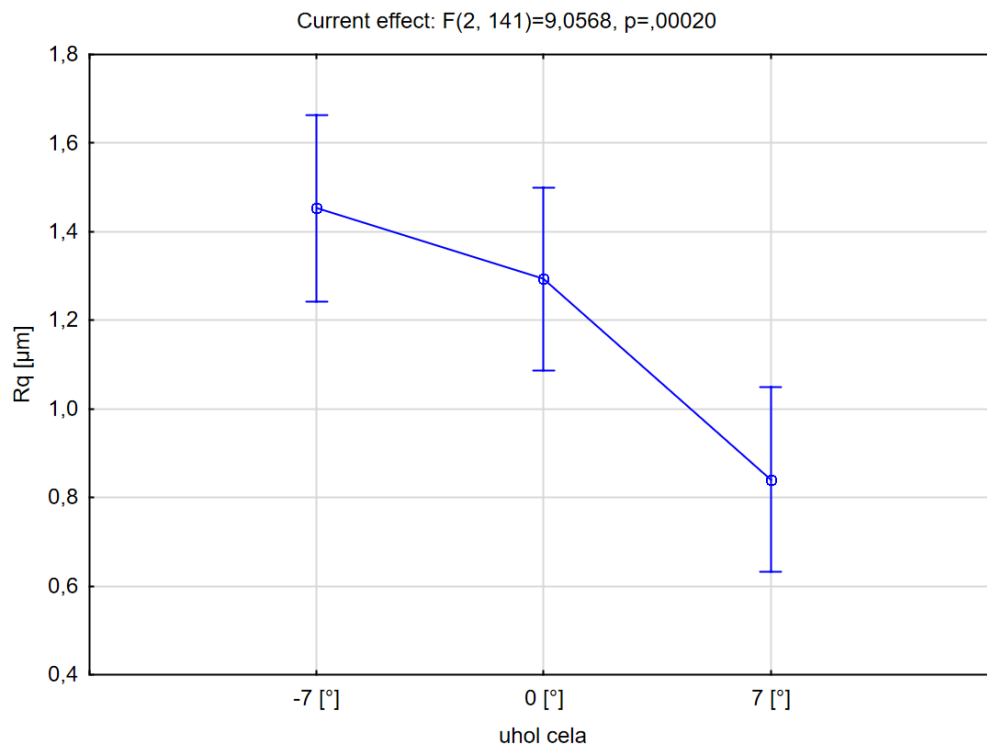


Graf 42 - Grafické vyjádření architektury sítě pro parametr Rz

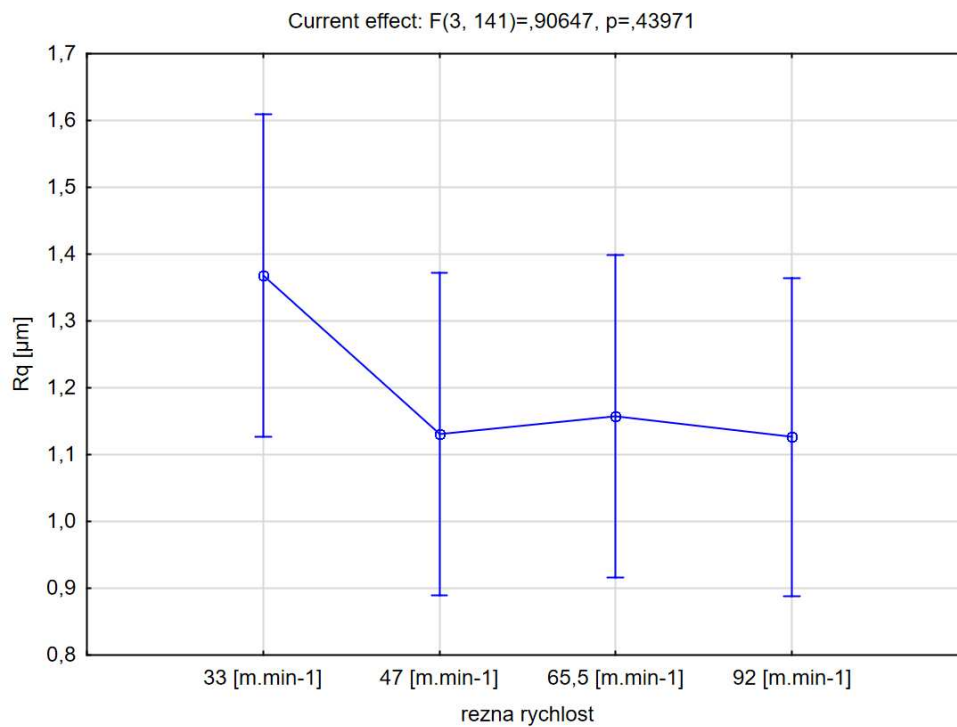


Graf 43 - Graf znázorňující relativní vliv prediktoru pro parametr Rz

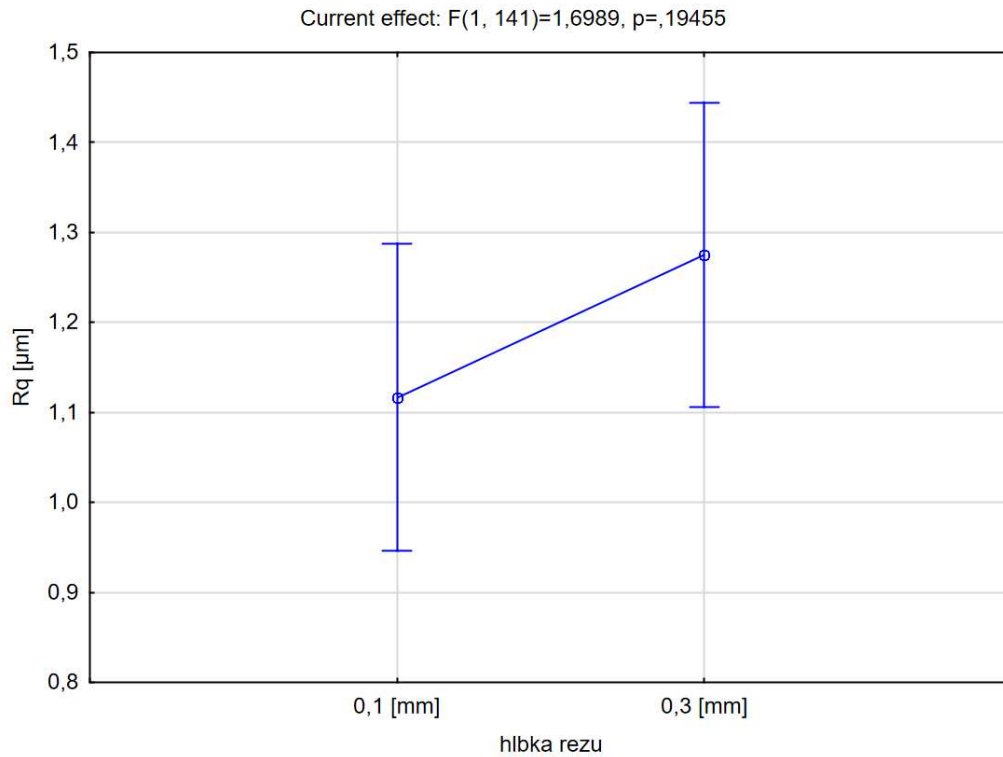
### 5.6.4 Hodnocení parametru Rq



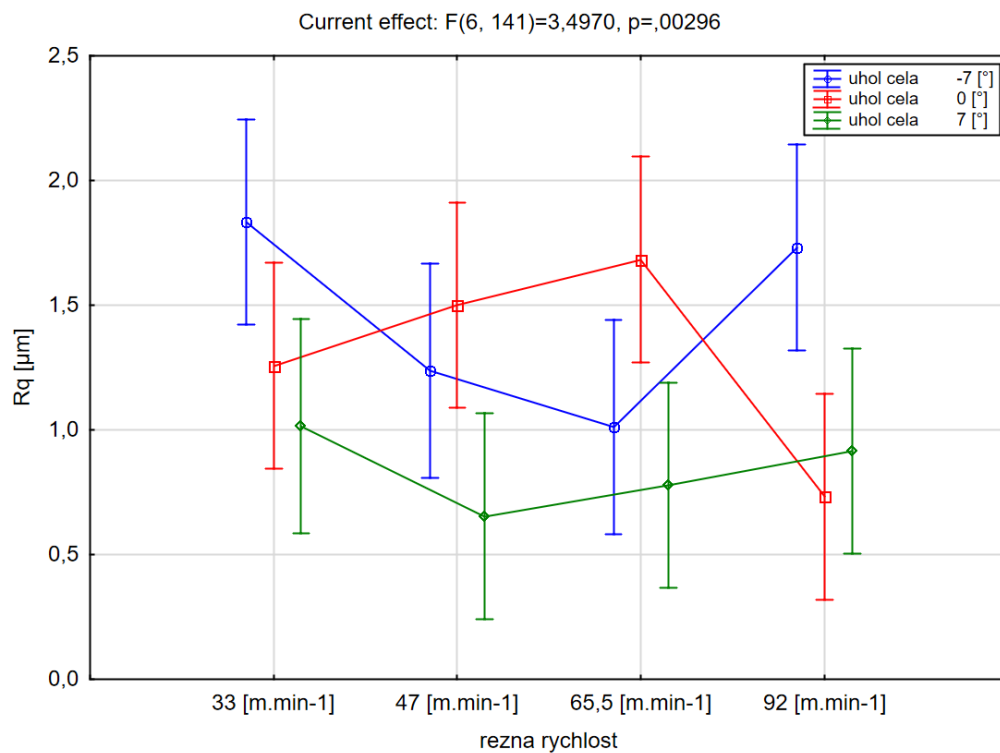
Graf 44 - Vliv nastavení úhlu čela na parametr drsnosti Rq



Graf 45 - Vliv řezné rychlosti na parametr drsnosti Rq

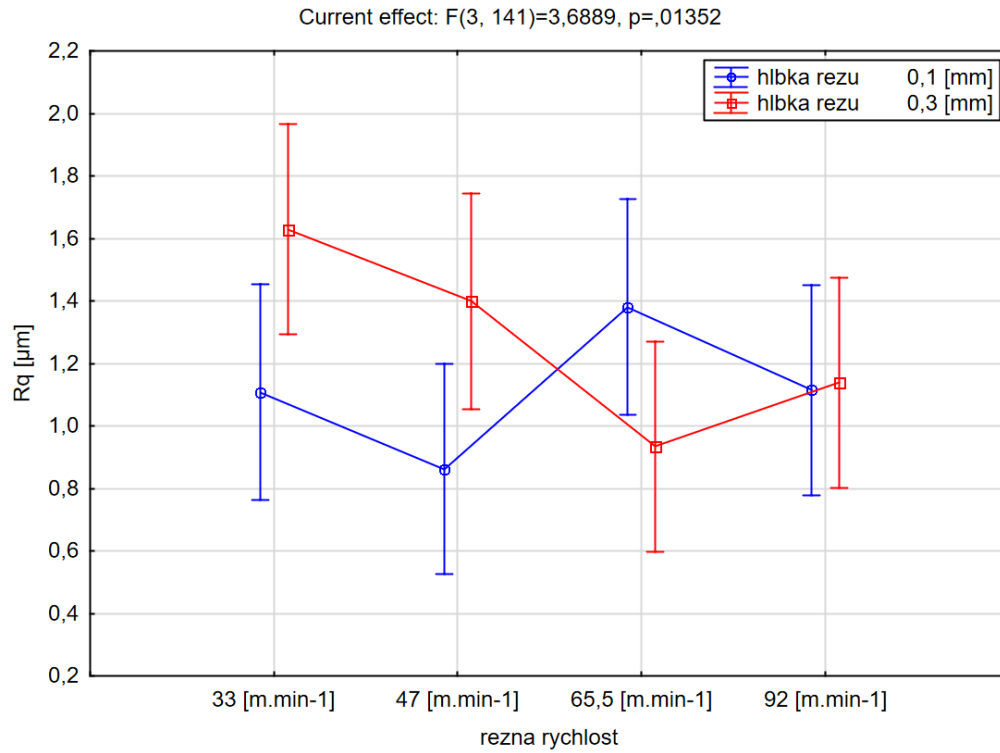


Graf 46 - Vliv hloubky řezu na parametr drsnosti Rq

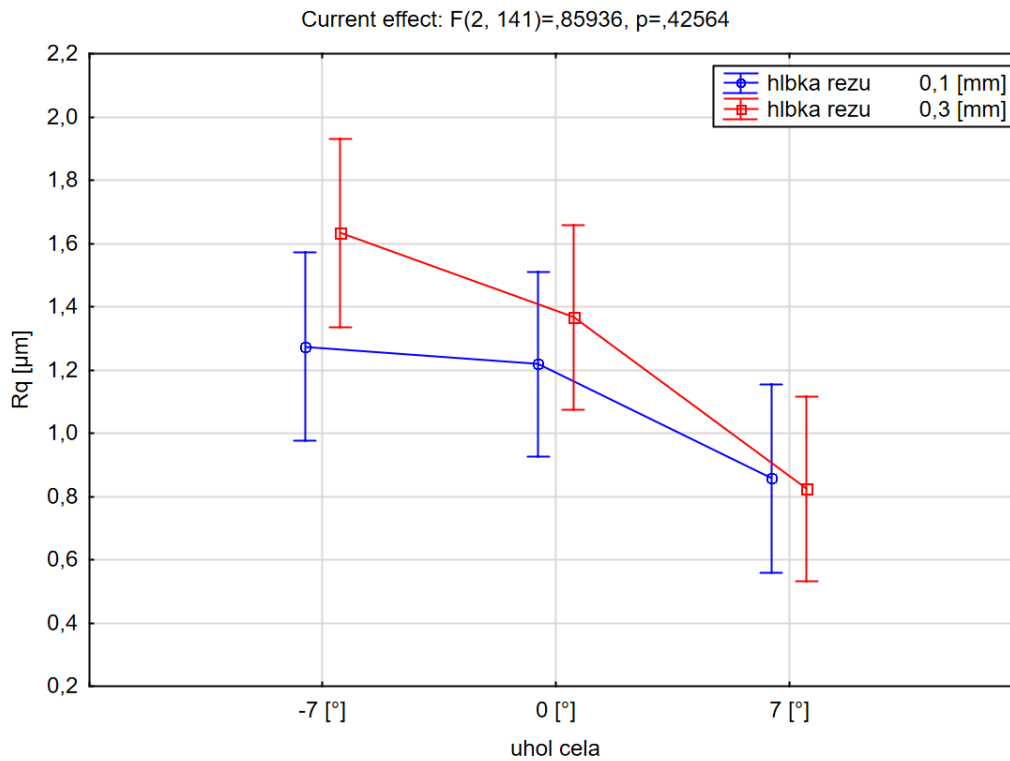


Graf 47 - Vliv nastavení úhlu čela a řezné rychlosti na parametr drsnosti Rq

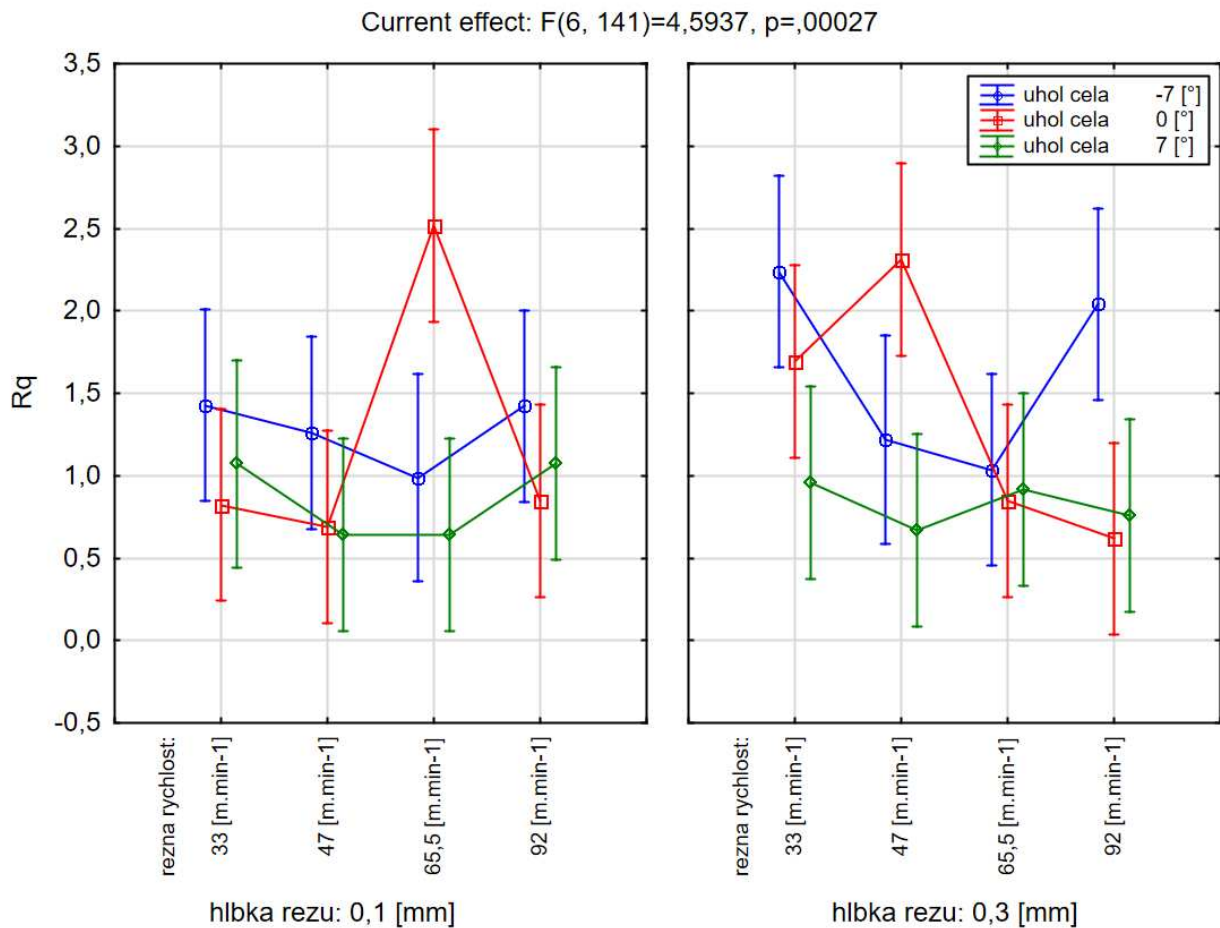




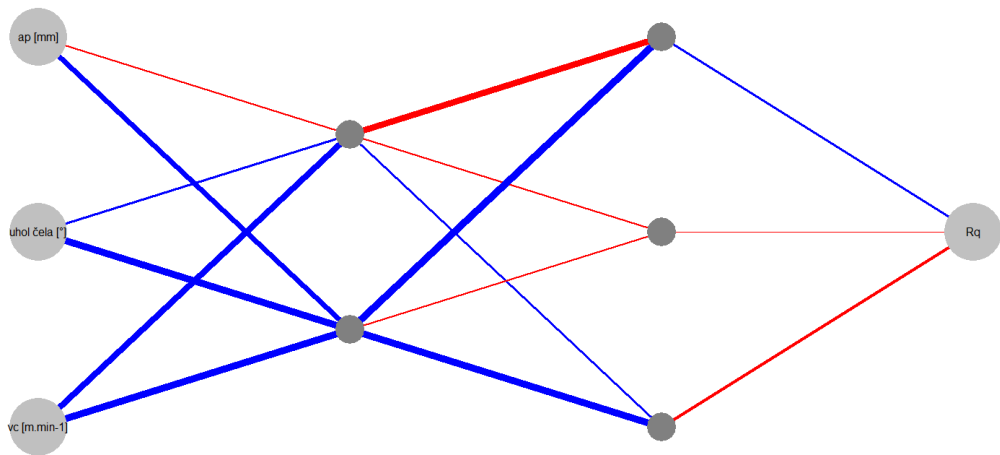
Graf 48 - Vliv řezné rychlosti a hloubky řezu na parametr drsnosti Rq



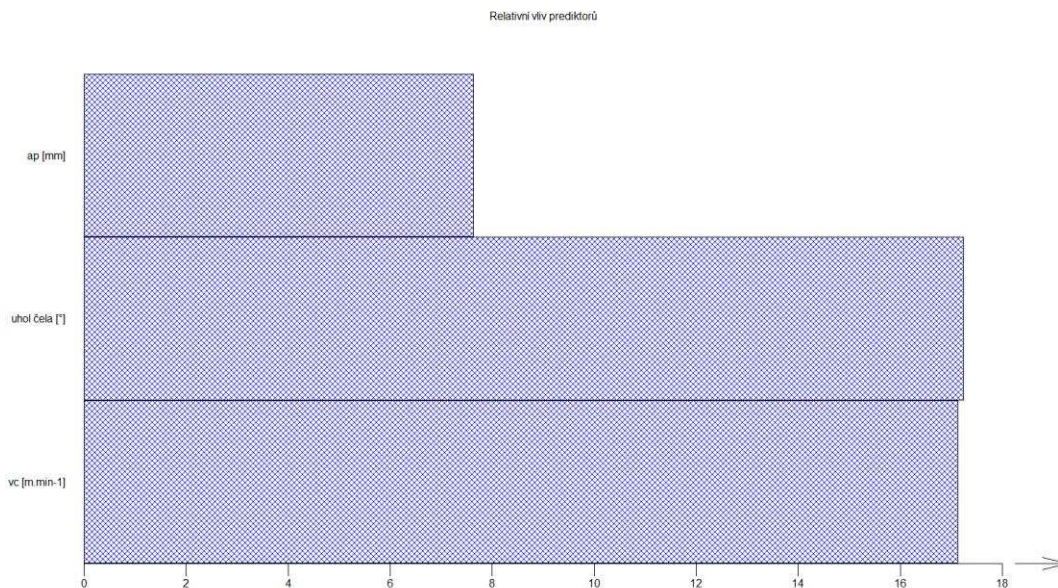
Graf 49 - Vliv nastavení úhlu čela a hloubky řezu na parametr drsnosti Rq



Graf 50 - Vliv nastavení úhlu čela, hloubky řezu a řezné rychlosti na parametr Rq

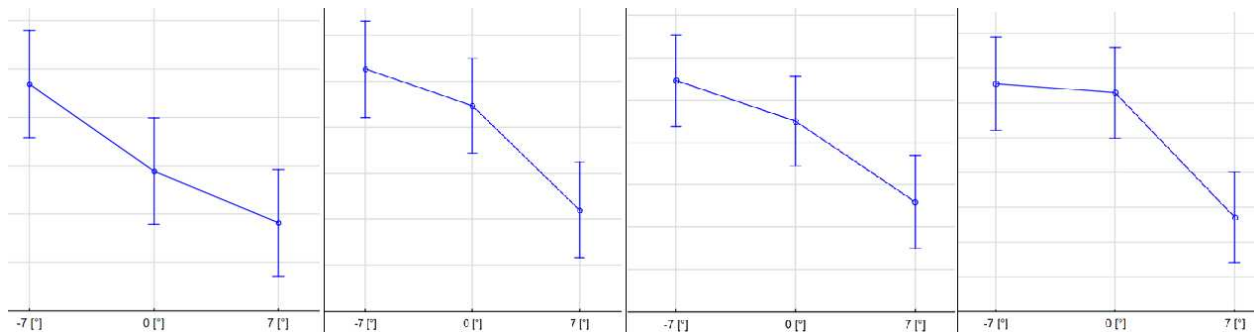


Graf 51 - Grafické vyjádření architektury sítě pro parametr Rq

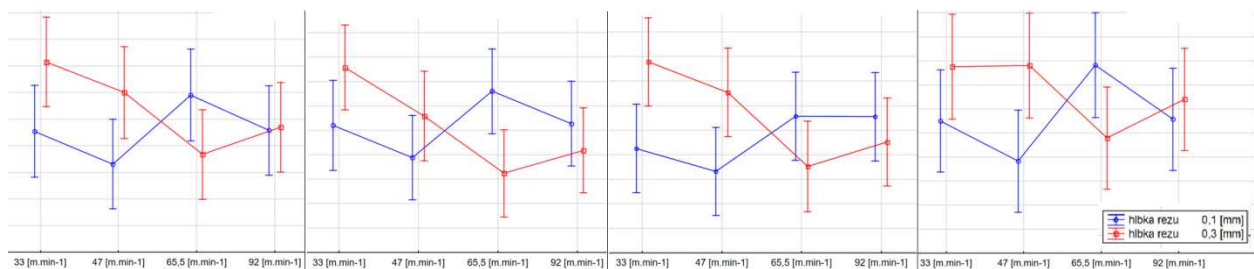


**Graf 52 - Graf znázorňující relativní vliv prediktorů pro parametr Rq**

Při porovnání uvedených grafů si lze všimnout velmi výrazné podobnosti u všech parametrů drsnosti, na kterých se provádělo statistické vyhodnocení. Pro lepší představu jsou uvedeny například vliv nastavení úhlu čela (graf 53) nebo interakce řezné rychlosti s hloubkou řezu na drsnosti obrobeneho povrchu (graf 54).



**Graf 53 - Vliv nastavení úhlu čela na drsnost obrobeneho povrchu**



**Graf 54 - interakce řezné rychlosti s hloubkou řezu na drsnosti obrobeneho povrchu**

Z uvedených grafů lze také dobře odhalit, jakým způsobem byla ovlivněna drsnost povrchu při změnách nastavení variovaných parametrů. V případě řezné rychlosti se drsnost povrchu s narůstající řeznou rychlostí zvyšuje, což potvrzuje teoretické předpoklady. Hloubka řezu z uvedených grafů vychází lépe při  $a_p = 0,1$  mm s výjimkou parametru Rz. U parametru Rz byla dosažena stejná drsnost povrchu v obou případech. Poslední variabilní veličinou je nastavení úhlu čela řezného nástroje. Z nastudovaných rešerší jsme očekávali lepší výsledky při nastavení úhlu čela  $\gamma = -7^\circ$ . Pomocí grafů statistického vyhodnocení tomu bylo přesně naopak, jak je možné vidět na grafu 53.

Pomocí neuronových sítí byl určen relativní vliv nastavení úhlu čela, hloubky řezu a řezné rychlosti na parametrech drsností Rt, Ra, Rz a Rq. Tato závislost je zobrazena na grafech číslo 25, 34, 43, 52. Při porovnání těchto grafů si lze povšimnout velké podobnosti u grafů 34 a 43, které jsou pro parametry Ra a Rz. Zde vyšel velmi výrazný vliv v nastavení úhlu čela, který je proti řezné rychlosti dvojnásobný a proti hloubce řezu dokonce čtyřnásobný.

Na parametr Rt měla nejvyšší vliv řezná rychlost, pak hloubka třísky a nakonec úhel čela v poměru 6:4:3. V posledním grafu 52 pro parametr Rq vyšli stejně velké vlivy úhlu čela a řezné rychlosti, které jsou dvojnásobné proti hloubce třísky.

V celkovém součtu těchto poměrů vyšel největší vliv na drsnost povrchu u nastavení úhlu čela. Poté následuje řezná rychlost a nejmenší vliv z uvedených grafů má hloubka řezu. Je zajímavé, že nejmenší vliv na drsnost má právě hloubka řezu, protože v případě měření profilu tomu bylo přesně naopak, viz kapitola 5.3.

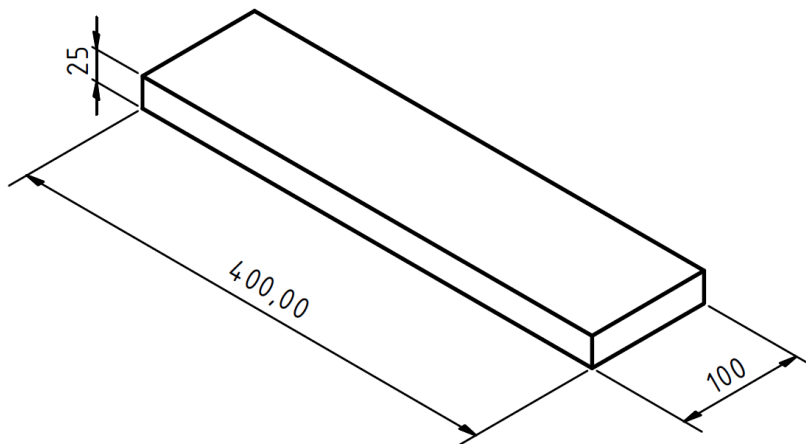
## 6 Technicko – ekonomické hodnocení

Cílem této diplomové práce je nejen pokus o nahrazení stávající technologie broušení za technologií obrázení, ale v případě dosažení stejné kvality povrchu provést i technicko – ekonomické zhodnocení obou variant. Z naměřených výsledků jsme došli k závěru, že je opravdu možné za určitých podmínek nahradit technologii broušení. Je třeba podotknout, že experiment byl proveden ve zjednodušené formě obrázení (ortogonální volné řezání). Pro následné výpočty budeme vycházet z úvahy, že stejných výsledků lze dosáhnout i při běžném způsobu obrázení.

Pro výpočet budeme vycházet z délky námi obráběného polotovaru. Polotovar bude mít rozměry 400 x 100 mm a výšku 25 mm, která však do výpočtu nezasahují. Na vrchní části polotovaru bude nanesena vrstva žárového nástřiku Stellite 6 s předpokládanou tloušťkou 0,5 mm. Při obrábění uvažuje o úběr 0,2 mm.

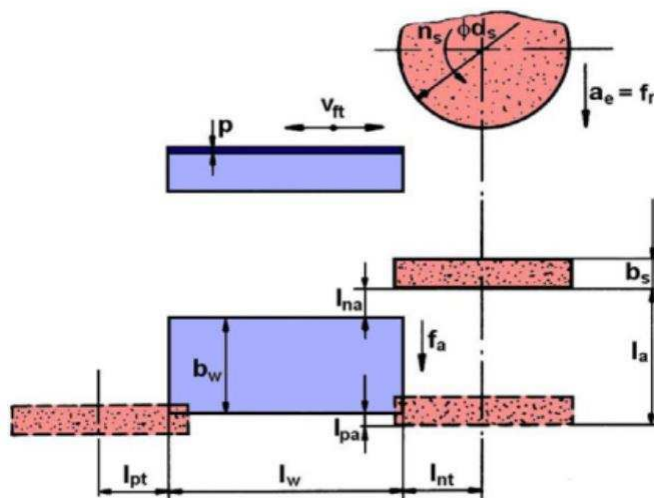
Řezné podmínky pro obrábění zvolíme takové, jaké jsme nastavili při obrábění polotovaru 17, u kterého jsme dosáhli nejlepších výsledků drsnosti povrchu. Řezná rychlost tedy bude  $v_c = 43$  m/min a hloubka třísky  $a_p = 0,1$  mm. Stejně tak pro výpočet použijeme stejnou břitovou destičku SCMW 120408. V případě výpočtu technologie broušení budeme při volbě řezných podmínek vycházet z empirických vztahů a běžně dohledatelných informací.

Na závěr je potřeba říci, že ve výpočtech nejsou zohledněny okolní časy, které vstupují do procesu jako např. upínání nástrojů, seřizování, výměna polotovarů, čištění apod.



Obrázek 51 – Polotovar pro výpočet jednotkového strojního času a finanční náročnosti

## 6.1 Broušení



Obrázek 52 - Schéma výpočtu strojního času při rovinném obvodovém broušení [36]

$l_w$  – délka obrobku [mm],  $l_w = 400$  mm

$l_{nt}$  – délka náběhu v tangenciálním směru [mm],  $l_{nt} = 10$  mm

$l_{pt}$  – délka přeběhu v tangenciálním směru [mm],  $l_{pt} = l_{nt} = 10$  mm

$l_t$  – dráha pohybu stolu v tangenciálním směru [mm],  $l_t = l_w + l_{nt} + l_{pt} = 10 + 400 + 10 = \mathbf{420}$  mm

$b_w$  – šířka broušené plochy [mm],  $b_w = 100$  mm

$l_{na}$  – délka náběhu v axiálním směru [mm],  $l_{na} = 10$  mm

$l_{pa}$  – délka přeběhu v axiálním směru [mm],  $l_{pa} = l_{na} = 10$  mm

$l_a$  – dráha pohybu stolu v axiálním směru [mm],  $l_a = b_w + l_{na} + l_{pa} = 10 + 100 + 10 = \mathbf{120}$  mm

$d_s$  – průměr brousícího kotouče [mm],  $d_s = 25$  mm

$f_a$  – axiální posuv stolu na jeden zdvih v tangenciálním směru [mm],  $f_a \approx 0,8 \cdot d_s = \mathbf{20}$  mm

$v_{ft}$  – tangenciální rychlost posuvu stolu brusky [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ],  $v_{ft} = 8 - 35$  m =>  $\mathbf{15} \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

$i$  – počet přejezdů [36],[37]

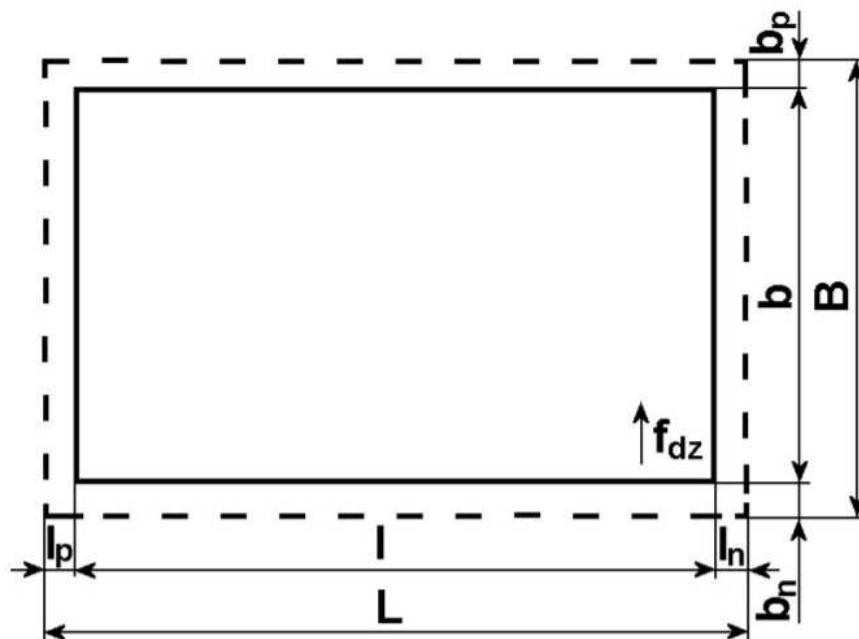
- Výpočet rezné rychlosti brusného kotouče

$$v_c = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n}{1000} = \frac{\pi \cdot 200 \cdot 50}{1000} = \mathbf{31,4} \text{ m/min}$$

- Výpočet jednotkového strojního času  $t_{AS}$

$$t_{AS} = \frac{l_t}{10^3 \cdot v_{ft}} \cdot \frac{l_a}{f_a} \cdot i = \frac{420}{10^3 \cdot 15} \cdot \frac{120}{20} \cdot 7 = 1,176 \text{ min} = \mathbf{70,56} \text{ s}$$

## 6.2 Obrázení



Obrázek 53 - Schéma výpočtu jednotkového strojního času při obrábění [38]

$b$  – šířka obrážené plochy [mm],  $b = 100$  mm

$b_n$  – délka náběhu ve směru šířky obrážené plochy [mm],  $b_n = 5$  mm

$b_p$  – délka přeběhu ve směru šířky obrážené plochy [mm],  $b_p = 5$  mm

$B$  – dráha pohybu stolu v tangenciálním směru [mm],  $B = b + b_n + b_p = 100 + 5 + 5 = 110$  mm

$l$  – délka obrážené plochy obrobku [mm],  $l = 400$  mm

$l_n$  – délka náběhu ve směru délky obrážené plochy [mm],  $l_n = 100$  mm

$l_p$  – délka přeběhu ve směru délky obrážené plochy [mm],  $l_p = 100$  mm

$L$  – celková dráha pohybu smýkadla [mm],  $L = l + l_n + l_p = 400 + 80 + 80 = 560$  mm

$f_{dz}$  – posuv stolu vykonávaný při zpětném pohybu [mm],  $f_{dz} = 10$  mm

$v_c$  – řezná rychlost obrážecího nože [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ],  $v_c = 43 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

$v_z$  – rychlost zpětného pohybu [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ],  $v_z \approx v_c \cdot 1,2 = 51,6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

$i$  – počet přejezdů [38]

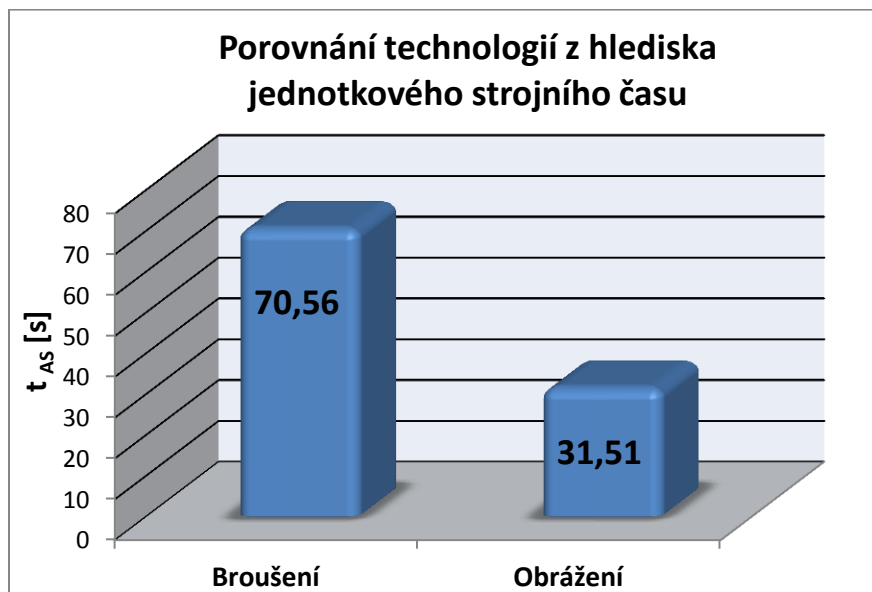
➤ Výpočet jednotkového strojního času  $t_{AS}$

$$t_{AS} = \frac{B}{f_{dz}} \cdot \left( \frac{L}{10^3 \cdot v_c} \cdot \frac{L}{10^3 \cdot v_z} \right) \cdot i = \frac{110}{10} \left( \frac{560}{10^3 \cdot 43} \cdot \frac{560}{10^3 \cdot 51,6} \right) \cdot 2$$

$$t_{AS} = 0,526 \text{ min} = 31,51 \text{ s}$$

### 6.3 Porovnání nákladů

Z vypočtených jednotkových strojních časů je nyní sestaven graf výhodnosti obou technologií. Při zadaných podmínkách lze s technologií obrázení ušetřit přibližně 55 % času výroby polotovaru. Je však důležité podotknout, že se jedná pouze o hodnoty teoretické, které nejsou ovlivněny řadou okolních faktorů.



Graf 55 - Porovnání technologií z hlediska jednotkového strojního času

Na základě vypočtených strojních časů je dále potřeba určit finanční náročnost obou technologií. Finální cenu výrobku ovlivňuje nejen potřebný čas na výrobu polotovarů, ale také strojní hodinová sazba stroje a cena použitých nástrojů. Pro zjednodušení výpočtu se uvažuje tak, že na výrobu jednoho kusu bude použita jedna ze čtyř řezných hrana VBD. Zároveň předpokládáme 8krát vyšší životnost brusného kotouče než řezné hrany VBD.

- Strojní hodinová sazba stroje broušení: 1200 Kč
- Strojní hodinová sazba obrázení: 900 Kč
- Cena VBD – slinutý karbid: 300 Kč
- Cena diamantového kotouče: 1000 Kč
- Jednotkový strojní čas broušení: 70,56 s
- Jednotkový strojní čas obrázení: 31,51 s
- Počet obráběných kusů: 8 ks

$$\text{Cena výroby 8 kusů při obrázení: } N_{o1} = (300 \cdot 2) + \left(900 \cdot \frac{31,51 \cdot 8}{3600}\right) = \mathbf{663 \text{ Kč}}$$

$$\text{Cena výroby 8 kusů při broušení: } N_{o1} = (1000) + \left(1200 \cdot \frac{70,56 \cdot 8}{3600}\right) = \mathbf{1188 \text{ Kč}}$$

Při tomto porovnání jsme získali informace o finanční náročnosti obou technologií včetně jednotkových strojních časů. Z porovnání je zřejmé, že výhodnější technologií, jak z hlediska časové tak i finanční náročnosti je technologie obrázení. Z výpočtu vychází, že u technologie obrázení je až 45 % úspora nákladů ve srovnání s technologií broušení.



## 7 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo docílit stejné nebo lepší kvality povrchu žárového nástřiku Stellite 6, který byl obráběn definovanou geometrií břitu při porovnání s technologií broušení. Hlavní myšlenka této změny spočívá ve zkrácení výrobních časů a tím zvýšení produktivity při obrábění žárového nástřiku a ve změně zbytkových tahových napětí na napětí tlaková. Diplomová práce se skládá z několika částí, které lze rozdělit na část teoretickou a část praktickou.

Úvod diplomové práce je věnován rešeršní části. Této problematice se v minulosti věnovalo několik výzkumných pracovišť a univerzit včetně Západočeské univerzity v Plzni. Získané informace a výsledky z experimentů byly pro nás určitým ukazatelem, jakým směrem pokračovat v řešení této problematiky. Po rešeršní části následuje část teoretická, ve které se věnujeme vlastnostem žárového nástřiku Stellite 6 a jednotlivým metodám jeho nanášení. Teoretická část je zakončena rozpravou o obrážecím procesu.

V praktické části se nejvíce věnujeme přípravě plánovaného experimentu, při které jsou definovány řezné podmínky, přípravek, obrážecí stroj, nástroj a obráběné polotovary. V experimentu jsme se rozhodli variovat řeznou rychlost ( $v_c = 20 - 55$  m/min), hloubku řezu ( $a_p = 0,1$  a  $0,3$  mm) a nastavení úhlu čela ( $-7^\circ, 0^\circ, +7^\circ$ ).

Po provedení experimentu následuje sekce vyhodnocení. V první části je proveden chemický rozbor obráběného žárového nástřiku, při kterém byla hodnocena mikrotvrdość, metalografie, chemický rozbor a tloušťka žárového nástřiku. Při porovnávání výsledků s tabulkovými hodnotami jsme nezaznamenali výrazné odlišnosti. Následně bylo provedeno hodnocení drsnosti a profilu obrobeného povrchu. Naměřené hodnoty drsností jsou zaznamenány v příloze 1. Nejlepší výsledek drsnosti  $R_a = 0,25$   $\mu\text{m}$  byl dosažen u polotovaru 17. Při hodnocení křivek profilů jsme došli k závěru, že výrazně lepších výsledků bylo dosaženo při obrábění menší hloubky řezu  $a_p = 0,1$  mm.

Vyhodnocení pokračuje popisem měření opotřebením výměnných břitových destiček. Hodnoty naměřených opotřebením čela a hřbetu jsou zaznamenány v tabulkách v příloze 2. Pro bližší pochopení způsobu vytváření třísky byl každý řez nahráván na vysokorychlostní kameru. Ve většině případů se jednalo o plynulou stužkovitou třísku. V jednom případě se tříska nezvykle hromadila před břitem a u polotovarů číslo 18, 23 a 24 nedocházelo k odběru předem stanovené hloubky řezu z důvodu velkého otláčení obrážecího nože. Z naměřených údajů drsnosti bylo vytvořeno statistické vyhodnocení k určení vlivů jednotlivých faktorů a jejich interakcí. Uvedené grafy se týkají parametrů drsností  $R_t$ ,  $R_a$ ,  $R_z$  a  $R_q$ . Diplomová práce je zakončena výpočtem technicko – ekonomického hodnocení, při kterém je porovnána technologie broušení s technologií obrážení. Z výpočtu je zřejmé, že u technologie obrážení je až 45 % úspora nákladů ve srovnání s technologií broušení.

Na úplný závěr lze říci, že provedený experiment a jeho vyhodnocení bylo přínosné. Získané výsledky nás opět posouvají o krok dále v řešení problematiky obrábění žárových nástřiků. Osobně si představuji využití získaných informací z této diplomové práce pro pokus o realizaci procesu obrážení na širším polotovaru s využitím posuvové složky pracovního stolu.

## 8 Seznam použité literatury

- [1] Žárově stříkané povlaky. MMSpektrum [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/zarove-strikane-povlaky-moderni-technologie-tvorby-povrchovych-ochra.html>
- [2] Slitiny na bázi kobaltu. Global Fusion [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <http://cz.alloy-powder.com/info/cobalt-based-alloy-22528923.html>
- [3] HASAN, Md Shahanur, Abdul Md MAZID a Richard E. CLEGG. Optimisation of the Machining of Stellite 6 PTA Hardfacing Using Surface Roughness. Key Engineering Materials [online]. 2010, **443**, 227-231 [cit. 2018-03-03]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.443.227. ISSN 1662-9795. Dostupné z: <http://www.scientific.net/KEM.443.227>
- [4] OZTURK, Sabri. Machinability of Stellite-6 Coatings with Ceramic Inserts and Tungsten Carbide Tools. Arabian Journal for Science and Engineering [online]. 2014, **39**(10), 7375-7383 [cit. 2018-03-03]. DOI: 10.1007/s13369-014-1343-9. ISSN 1319-8025. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s13369-014-1343-9>
- [5] Kašpar, J: *Optimalizace technologických faktorů obrábění těžkoobrobitelných nástřiků experimentálními postupy zaměřenými na splnění funkčních vlastností*, [Diplomová práce], Plzeň ZČU, FST, KTO, 2017.
- [6] Kološ, D: *Závislost vybraných parametrů hodnocení obrobeneých ploch tvrdých povlaků na konstrukci řezného nástroje*, [Diplomová práce], Plzeň ZČU, FST, KTO, 2017.
- [7] Morávek, M: *Vliv vstupních parametrů mikro a makro struktury vybraného typu povlaku na jeho obrobitelnost nástroji s definovanou geometrií břitu*, [Diplomová práce], Plzeň ZČU, FST, KTO, 2016.
- [8] Žárové nástřiky. Tribo engineering [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <http://www.triboing.cz/zarove-nastriky.html>
- [9] Hardfacing Alloys. Kennametal Stellite [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: [http://www.stellite.com/content/dam/kennametal/stellite/literature/Brochures/B-16-05107\\_KMT\\_Stellite\\_HardfacingAlloys\\_Brochure\\_EN\\_LR.pdf](http://www.stellite.com/content/dam/kennametal/stellite/literature/Brochures/B-16-05107_KMT_Stellite_HardfacingAlloys_Brochure_EN_LR.pdf)
- [10] Stellite 6 Alloy. Doloro Stellite [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <http://exocor.com/downloads/product-datasheets/Stellite-6-Datasheet.pdf>
- [11] Česánek, Z: *Žárově stříkané povlaky používané v korozně působícím prostředí*, [Disertační práce], Plzeň ZČU, FST, KMM, 2015.
- [12] Bodová koroze. In: <http://ukmki.vscht.cz> [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Bodov%C3%A1%20koroze.pdf?redirected>
- [13] Řehoř, J., „Teorie Obrábění,“ [prezentace], [Citace 6. 5. 2017]
- [14] Žárové stříkání. Plasmametal [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <http://www.plasmametal.cz/pouzite-technologie>

- [15] Žárové a plazmové technologie – žárové nástřiky. Sammetal [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <http://www.sammetal.cz/technologie/zarove-a-plazmove-technologie-zarove-nastriky>
- [16] Šildberger, R: *Optimalizace parametrů nástřiku elektrickým obloukem*, [Diplomová práce], Brno VUTBR, FSI, ÚST, 2008.
- [17] *Princip vytváření a struktura žárového nástřiku*. [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/docs-images/62/47464281/images/13-0.jpg>
- [18] Líbal, M: *Stanovení hlavních parametrů ovlivňujících přilnavost a odolnost povlaků žárových nástřiků vytvořených elektrickým obloukem*, [Diplomová práce], Plzeň ZČU, FST, KMM, 2013.
- [19] *Porovnání metod nanášení žárových nástřiků*. [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/docs-images/39/18249171/images/32-0.png>
- [20] *Základy obrábění* [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/obrabeni.htm>
- [21] *Technologie obrábění* [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: [http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY\\_01\\_001/Technologie%20obrabeni.pdf](http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_001/Technologie%20obrabeni.pdf)
- [22] Technologie obrázení. In: [www.sspu-opava.cz](http://www.sspu-opava.cz) [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: [http://www.sspu-opava.cz/UserFiles/File/\\_sablon/Praxe\\_II\\_a\\_III/VY\\_52\\_INOVACE\\_H-02-32.pdf](http://www.sspu-opava.cz/UserFiles/File/_sablon/Praxe_II_a_III/VY_52_INOVACE_H-02-32.pdf)
- [23] Geometrie břítu. <https://eluc.kr-olomoucky.cz/> [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1816>
- [24] *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. Praha: Sandvik Coromant, 1997. ISBN 9197229946.
- [25] Základy teorie třískového obrábění. <http://web.sstzr.cz> [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <http://web.sstzr.cz/download/cat1/technologie-strojního-obrabení.pdf>
- [26] Obrázeční stroj a jeho parametry. <http://www.tumlikovo.cz/> [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/rubriky/stroje-2/obrazicka/strigon-gh560/>
- [27] Přehled vlastností oceli 42CrMo4. [www.bolzano.cz](http://www.bolzano.cz) [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: [https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP\\_%20Tycova\\_ocel/EN\\_10083/MOP\\_vlastnosti\\_42CrMo4.pdf](https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10083/MOP_vlastnosti_42CrMo4.pdf)
- [28] Katalog řezných nástrojů. [www.iscar.com](http://www.iscar.com) [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/Item.aspx?cat=5600111&fnum=340&mapp=ML&GFSTYP=M&srch=1>
- [29] Přehled jakostí ocelí. <http://www.feromat.cz> [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: [http://www.feromat.cz/jakosti\\_oceli](http://www.feromat.cz/jakosti_oceli)

- [30] Způsoby měření tvrdosti. <http://www.kalirna.cz> [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <http://www.kalirna.cz/cz/sluzby/item/36-mereni-tvrlosti.html>
- [31] Novák, J: *Funkční plochy a struktura povrchu*, [Bakalářská práce], Brno VUTBR, FSI, ÚST, 2008.
- [32] Vlastnosti povrchu. [www.skf.com](http://www.skf.com) [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <http://www.skf.com/cz/products/seals/industrial-seals/hydraulic-seals/general-technical-information/specifications-for-effective-sealing-systems/counter-surface-finish-properties/index.html>
- [33] Parametry vysokorychlostní kamery. <https://photron.com> [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <https://photron.com/fastcam-sa-x2/>
- [34] Manuál pro program Statistica. <https://anzdoc.com> [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <https://anzdoc.com/ovladani-a-zaklady-statistiky-v-software-statistica.html>
- [35] Princip neuronových sítí. [www.statsoft.cz](http://www.statsoft.cz) [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: [http://www.statsoft.cz/file1/PDF/newsletter/2013\\_02\\_05\\_StatSoft\\_Neuronove\\_site\\_linky.pdf](http://www.statsoft.cz/file1/PDF/newsletter/2013_02_05_StatSoft_Neuronove_site_linky.pdf)
- [36] Výpočet strojního času broušení. <https://eluc.kr-olomoucky.cz/> [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1280>
- [37] Řezné podmínky při obrábění. [www.kom.tul.cz](http://www.kom.tul.cz) [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: [http://www.kom.tul.cz/soubory/tob\\_rp.pdf](http://www.kom.tul.cz/soubory/tob_rp.pdf)
- [38] Výpočet strojního času obrábění. [www.ust.fme.vutbr.cz](http://www.ust.fme.vutbr.cz) [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: [http://www.ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI\\_TO-2cast.pdf](http://www.ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-2cast.pdf)

## Použitý software

- Catia V5R21
- Autodesk Inventor 2017
- Microsoft Office
- Photron FASTCAM Viewer
- QC.Expert
- STATISTICA

## 9 Seznam příloh

PŘÍLOHA 1 – Tabulka naměřených drsností .....	II
PŘÍLOHA 2 – Tabulky naměřených opotřebení .....	IV
PŘÍLOHA 3 – Výkres obrážecího nože ( $\gamma = 0^\circ$ ) .....	VI
PŘÍLOHA 4 – Výkres obrážecího nože ( $\gamma = -7^\circ$ ) .....	VIII
PŘÍLOHA 5 – Výkres obrážecího nože ( $\gamma = +7^\circ$ ) .....	X

## **PŘÍLOHA č. 1**

### **TABULKA NAMĚŘENÝCH DRSNOSTÍ**

Číslo plechu	Pt [μm]	Pz [μm]	Pa [μm]	Rt [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	RSm [mm]	Wt [μm]	Wz [μm]	Wa [μm]	Rpk [μm]	Rk [μm]	Rvk [μm]	Rmr1 [%]	Rmr2 [%]
1	27,75	21,57	3,77	4,78	3,8	0,5	0,1825	19,64	4,21	3,66	0,49	1,15	1,72	9,8	84,5
2	27,06	23,72	6,47	2,33	1,86	0,33	0,1797	22,84	6,37	6,36	0,53	0,98	0,36	11,2	87,5
3	9,29	8,93	2,02	2,09	1,66	0,28	0,2204	7,49	2,22	1,97	0,42	0,73	0,54	14,8	91,2
4	20,15	18,54	2,65	12,41	7,2	0,96	0,3531	7,8	3,93	2,4	0,81	1,28	4,74	9,3	78,1
5	16,5	15,94	1,85	7,51	6,18	0,78	0,1723	8,98	2,87	1,43	0,43	1,67	2,83	8,5	81,7
6	26,28	26,28	2,79	19,3	6,92	1,06	0,3813	9,33	3,08	2,57	0,48	1,3	4,61	7,1	77,8
7	9,26	9,26	0,86	7,04	4,95	0,6	0,3327	2,51	1,2	0,63	0,8	1,01	2,7	10,9	83,8
8	10,48	10,48	1,18	11,79	4,64	0,58	0,2527	3,09	1,64	0,86	1,54	1,08	1,51	10,1	83,4
9	15,87	12,2	2,8	8,03	5,04	0,54	0,2376	8,15	2,77	2,66	0,51	1,05	1,83	9,4	76,5
10	13,54	12,37	1,63	12,07	4,43	0,67	0,3495	6,25	2,05	1,25	0,98	1,08	3,71	15,5	91
11	7,26	7	1,29	2,7	1,6	0,26	0,3036	4,34	2,49	1,12	0,7	0,59	1,02	14,3	83,5
12	9,51	9,2	2,12	7,9	2,92	0,41	0,4164	7,22	2,57	1,95	0,85	0,76	1,57	23,5	84,9
13	13,87	11,33	1,95	11,4	4,78	0,71	0,3794	8,81	2,16	1,75	0,91	1,32	2,34	9,8	77,4
14	16,92	15,35	3,05	4,34	2,74	0,56	0,5065	12,57	3,24	2,95	1,5	1,12	1,81	16,1	84,4
15	46,49	40,26	5,21	38,55	23,45	3,94	0,1667	14,49	7,19	2,77	6,03	5,95	15,04	6,9	70,8
16	8,42	8,42	1,86	3,27	1,65	0,29	0,2742	5,84	1,65	1,81	0,72	0,8	0,89	10,2	89,3
17	11,85	8,73	1,69	5,22	2,29	0,25	0,3009	8,2	1,92	1,65	0,63	0,51	0,73	14,2	87
18	29,11	27,6	3,33	12,59	3,95	0,38	0,4533	16,42	4,3	3,17	0,57	0,67	1,54	16,6	83,1
19	20,82	15,2	2,56	14,33	6,37	0,96	0,389	9,6	2,57	2,24	1,83	2,36	4,31	11	89,1
20	52,84	52,76	4,62	41,62	15,23	2,41	0,3954	20,42	5,98	3,43	2,71	3,12	18,28	9,5	82,2
21	6,82	6,75	0,7	5,83	3,81	0,56	0,2508	1,64	0,96	0,39	0,26	1,36	1,74	9	84
22	22,92	19,52	3,41	9,38	4,16	0,48	0,368	12,46	3,6	3,28	0,77	0,85	1,96	12,4	79,6
23	27,28	22,4	3,42	11,7	5,56	0,59	0,4416	12,97	3,94	3,03	0,71	1,12	3,61	9,9	82,5
24	14,07	14,07	1,29	9,76	5,42	0,66	0,4998	5,47	2,4	0,86	0,57	1,18	4,17	11	76,1

## **PŘÍLOHA č. 2**

# **TABULKY NAMĚŘENÝCH OPOTŘEBENÍ**

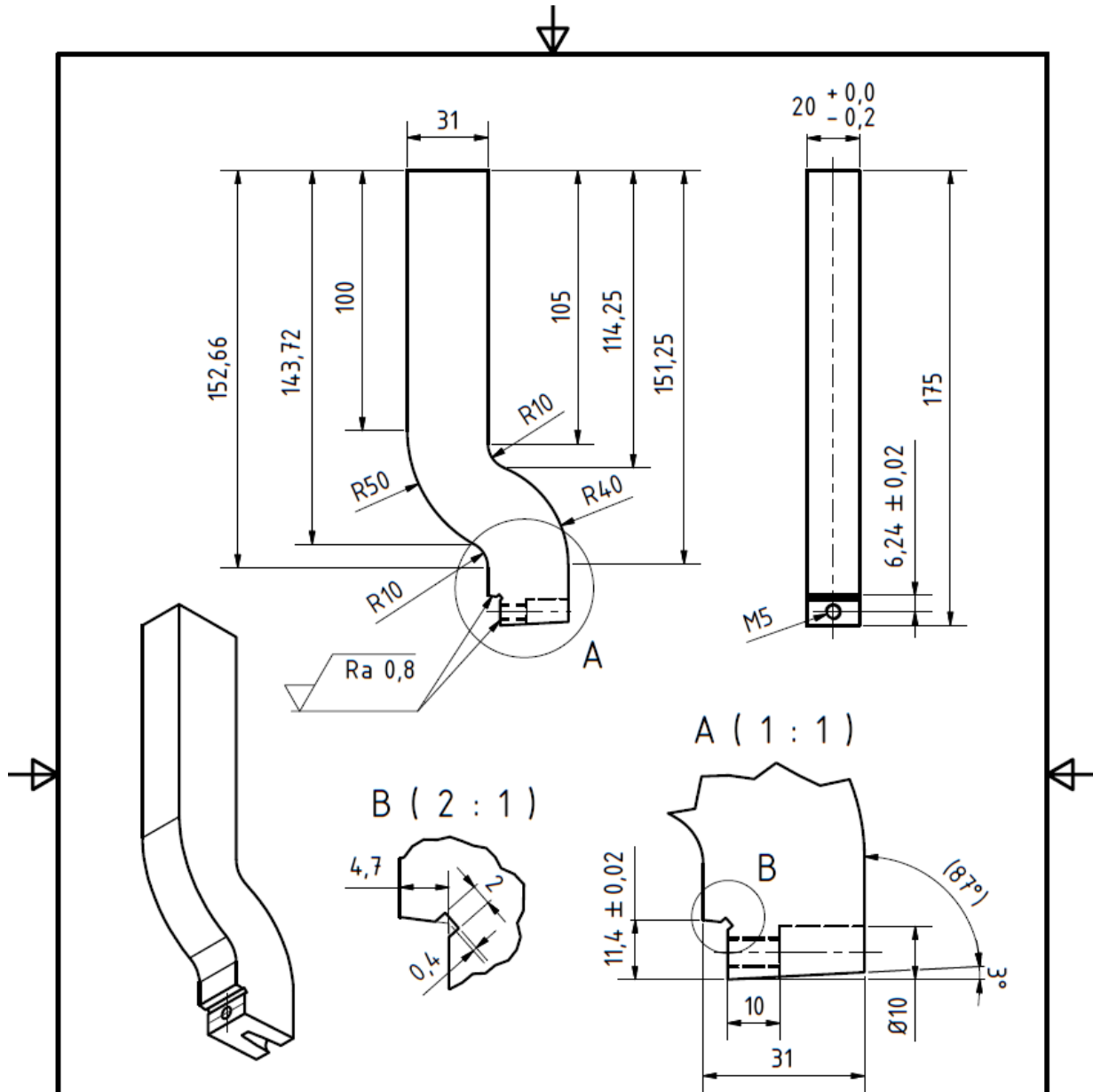


Č. hřbetu	Opotřebení VB <sub>b</sub> [mm]	Nárůstek [mm]
1	0,11	0,12
2	0,21	0,1
3	0,13	0,09
4	0,22	0,17
5	0,14	0,05
6	0,12	0,02
7	0,12	0,07
8	0,17	0,03
9	0,05	0,05
10	0,28	0,03
11	0,13	0,01
12	0,11	0,1
13	0,15	0,18
14	0,18	0,78
15	0,06	0,02
16	0,18	0,04
17	0,12	0,04
18	0,09	0,13
19	0,17	0,24
20	0,19	0,27
21	0,13	0,12
22	0,1	0,11
23	0,05	0,02
24	0,11	0,08

Č. čela	Opotřebení KB <sub>b</sub> [mm]	Nárůstek [mm]
1	0,33	0,01
2	0,59	0,02
3	0,25	0,08
4	0,17	0,03
5	0,15	0,02
6	0,57	0,03
7	0,38	0,02
8	0,44	0,02
9	0,17	0,02
10	0,67	0,01
11	0,13	0
12	0,45	0,04
13	0,39	0,03
14	0,35	0,52
15	0,13	0
16	0,3	0,02
17	0,11	0,01
18	0,55	0
19	0,38	0,01
20	0,56	0,02
21	0,2	0,02
22	0,61	0,03
23	0,12	0
24	0,58	0

## **PŘÍLOHA č. 3**

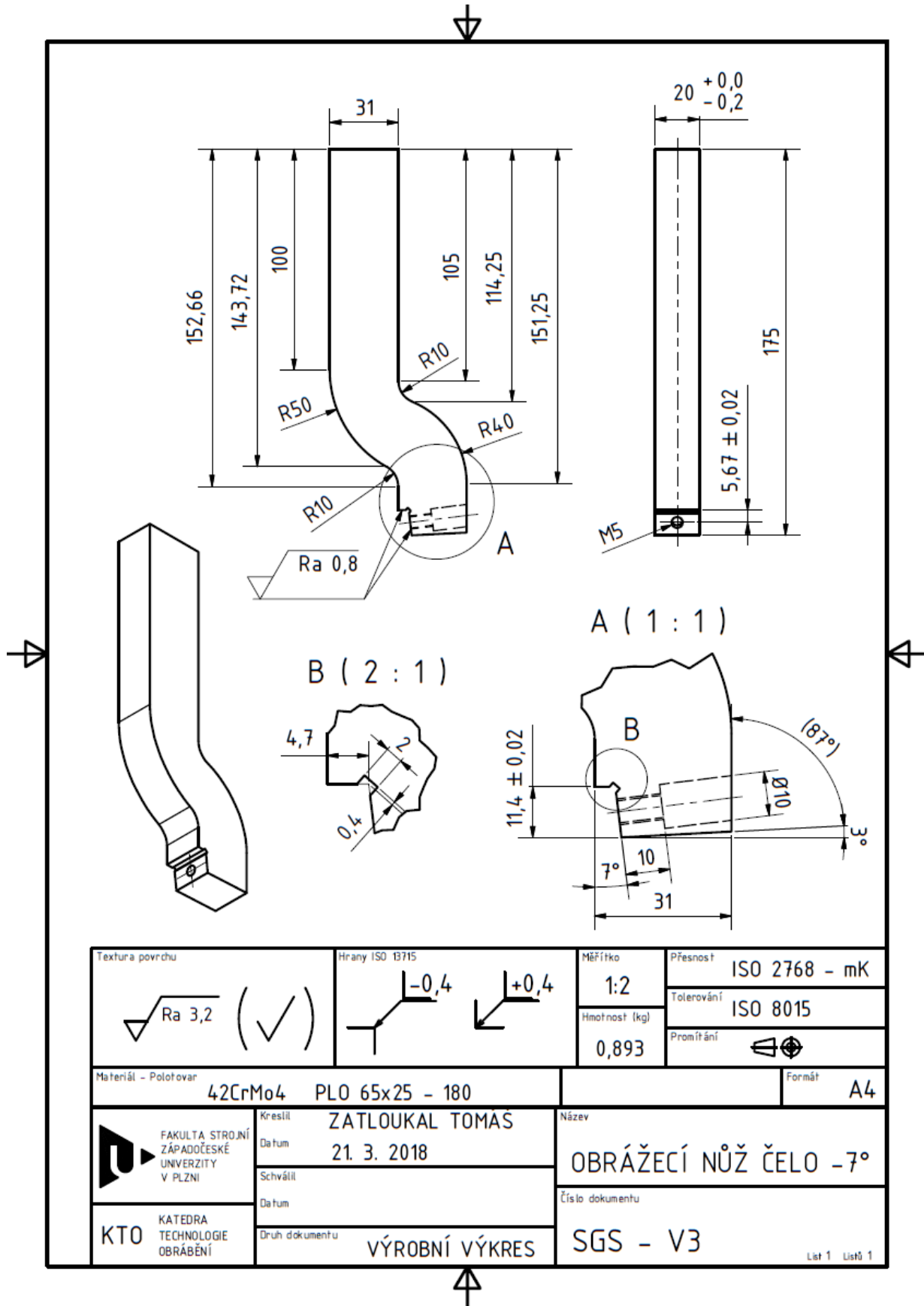
### **VÝKRES OBRÁŽECÍHO NOŽE ( $\gamma = 0^\circ$ )**



Textura povrchu 	Hrany ISO 13715 	Měřítko 1:2 Hmotnost (kg) 0,893	Přesnost ISO 2768 - mK Tolerování ISO 8015 Promítání 
Materiál - Polotovár 42CrMo4 PLO 65x25 - 180		Formát A4	
	Kreslil ZATLOUKAL TOMÁŠ Datum 21. 3. 2018	Název OBRÁŽECÍ NŮŽ ČELO 0°	
	Schválil Datum Druh dokumentu VÝROBNÍ VÝKRES	Číslo dokumentu SGS - V1	

## **PŘÍLOHA č. 4**

### **VÝKRES OBRÁŽECÍHO NOŽE ( $\gamma = -7^\circ$ )**



## **PŘÍLOHA č. 5**

### **VÝKRES OBRÁŽECÍHO NOŽE ( $\gamma = +7^\circ$ )**

