ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: **N0715A270011 - Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality**

Studijní specializace: **Bez specializace**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv výrobní technologie na životnost vybraných výrobních nástrojů

Autor: Bc. Adrián Bibko

Vedoucí práce: Doc. Ing. Jan ŘEHOŘ, Ph.D.

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojní
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	**Bc. Adrián BIBKO**
Osobní číslo:	**S20N0001P**
Studijní program:	**N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality**
Téma práce:	**Vliv výrobní technologie na životnost vybraných výrobních nástrojů**
Zadávající katedra:	**Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování

1. Úvod do problematiky
2. Charakteristika vybraných výrobních nástrojů
3. Aplikovatelnost progresivních technologií obrábění na vybrané nástroje
4. Návrh technologie výroby
5. Výroba zvoleného řezného nástroje
6. Testování životnosti
7. Technicko – ekonomické zhodnocení
8. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- Elektronické informační zdroje dostupné z www.knihovna.zcu.cz.
- CIRP ANNALS – Manufacturing Technology: (http://www.cirp.net/)
- Spektrum, MM Průmyslové dostupné z www.mmspektrum.com
- SANDVIK Coromant, Sandviken: Technická příručka obrábění, dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Konzultanti diplomové práce: **Ing. Jan Hnátík, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění
Dušan Nesnídal
Mubea s.r.o.

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2022**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

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

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

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Doc. Ing. Janu Řehořovi, Ph.D. za veškeré podněty v průběhu řešení diplomové práce, obzvlášť ve chvílích velkých nejistot.

Zároveň bych chtěl také vyjádřit poděkování panu Dušanu Nesnídalovi a jeho kolegům za zprostředkování tohoto zadání a praktickou pomoc během zpracování diplomové práce.

V neposlední řadě patří velké poděkování mé rodině za podporu a vytvoření potřebného zázemí po celou dobu studia.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	**Příjmení** Bibko	**Jméno** Adrián	
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270011 - Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality		
VEDOUCÍ PRÁCE	**Příjmení (včetně titulů)** Doc. Ing. Řehoř, Ph.D.	**Jméno** Jan	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	**DIPLOMOVÁ**	~~**BAKALÁŘSKÁ**~~	**Nehodící se škrtněte**
NÁZEV PRÁCE	Vliv výrobní technologie na životnost vybraných výrobních nástrojů		

FAKULTA	strojní		**KATEDRA**	KTO	**ROK ODEVZD.**	2022

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	76		**TEXTOVÁ ČÁST**	55	**GRAFICKÁ ČÁST**	21

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) **ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY**	Diplomová práce je zaměřena na výrobní technologie a jejich vliv na životnost výrobních nástrojů. Součástí práce je návrh technologie výroby a samotná výroba výrobních nástrojů. Dále je provedeno testování životnosti nástrojů a návrhů pro další zvýšení jejich životnosti. V závěru je provedeno technicko-ekonomické zhodnocení.
KLÍČOVÁ SLOVA **ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE**	vysokoposuvové frézování, trochoidní frézování, rohové frézování, střižná hrana, opotřebení nástroje, Laser Shock Peening

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	**Surname** Bibko	**Name** Adrián	
STUDY PROGRAMME	N0715A270011 Machining, additive technologies and quality asssurance		
SUPERVISOR	**Surname (Inclusive of Degrees)** Doc. Ing. Řehoř, Ph.D.	**Name** Jan	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	**DIPLOMA**	~~**BACHELOR**~~	**Delete when not applicable**
TITLE OF THE WORK	Influence of production technology on the tool life of selected production tools		

FACULTY	Mechanical Engineering		**DEPARTMENT**	Department of machining		**SUBMITTED IN**	2022

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	76		**TEXT PART**	55		**GRAPHICAL PART**	21

BRIEF DESCRIPTION **TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS**	Diploma thesis is focused on the production technologies and their influence on the tool life. Thesis contains the design of the production technlogy and the production of tools. Furthermore, testing of the tool life and suggestions for further increase of the tool life are performed. Technical and economic evaluation is made in the end.
KEY WORDS	high-feed milling, trochoidal milling, shoulder milling, cutting edge, tool wear, Laser Schock Peening

Obsah

Přehled použitých zkratek a symbolů ... 9
Seznam obrázků ... 10
Seznam tabulek ... 12
1 Úvod ... 13
1.1 Úvod do problematiky ... 14
2 Charakteristika vybraných výrobních nástrojů ... 15
2.1 Charakteristika výrobního procesu ... 16
2.1.1 Technologie tváření – stříhání ... 18
2.2 Spodní matrice ... 20
2.3 Svrchní matrice ... 21
2.4 Střižný nůž ... 22
3 Aplikovatelnost progresivních technologií obrábění na vybrané nástroje ... 23
3.1 Vysokoposuvové frézování ... 25
3.2 Trochoidní frézování ... 27
3.2.1 Chip thinning ... 29
3.3 Rohové frézování ... 31
3.4 Vlastní aplikovatelnost progresivních technologií obrábění ... 31
4 Návrh technologie výroby ... 32
4.1 Střižný nůž ... 32
4.1.1 Hrubovací strategie ... 33
4.2 Svrchní matrice ... 35
4.3 Spodní matrice ... 36
4.3.1 Hrubovací strategie ... 37
4.4 Výrobní zařízení ... 38
4.4.1 Alzmetall GS800/5 ... 38
4.4.2 Blohm REDLINE S ... 40
4.4.3 AgieCharmilles AC Progress VP3 ... 41
4.4.4 Carl Zeiss ScanMax ... 42
5 Výroba zvoleného řezného nástroje ... 43
5.1 Výroba střižného nože ... 43
5.1.1 Konvenční metoda s využitím rohového frézování ... 43
5.1.2 Vysokoposuvové frézování ... 45
5.1.3 Trochoidní frézování ... 46
5.2 Výroba spodní matrice ... 48

5.2.1 Konvenční metoda s využitím rohového frézování ... 48
5.2.2 Vysokoposuvové frézování ... 49
5.2.3 Trochoidní frézování ... 49
5.2.4 Dokončování ... 50
5.3 Výroba svrchní matrice ... 53
6 Testování životnosti ... 54
6.1 Analýza současného stavu ... 54
6.2 Vlastní testování životnosti ... 56
6.2.1 Stav nástroje po 3 000 vyrobených kusech ... 58
6.2.2 Stav nástroje po 6 000 vyrobených kusech ... 60
6.2.3 Stav nástroje po 27 000 vyrobených kusech ... 61
6.3 Příčiny opotřebení nástrojů ... 64
6.4 Zhodnocení vlivu výrobních technologií na životnost výrobních nástrojů ... 65
6.5 Návrhy zvýšení životnosti nástrojů ... 66
6.5.1 Změna intenzity chlazení střižné hrany ... 66
6.5.2 Změna konstrukce střižníku ... 66
6.5.3 Změna mikrogeometrie břitu ... 69
6.5.4 Laser Shock Peening ... 70
7 Technicko – ekonomické zhodnocení ... 72
7.1 Zhodnocení výrobních technologií ... 72
7.2 Zhodnocení použití povrchové úpravy LSP ... 77
8 Závěr ... 78
Seznam použitých zdrojů ... 79

Přehled použitých zkratek a symbolů

VBD	Vyměnitelná břitová destička
HFM	Vysokoposuvové frézování (high-feed milling)
HEM	High Efficiency Milling (vysoko-účinné frézování)
LSP	Laser Shock Peening
CAM	Computer Aied Manufacturing
C	Uhlík
Si	Křemík
Mn	Mangan
Cr	Chrom
Mo	Molybden
V	Vanad
W	Wolfram
Al	Hliník
N	Dusík
z	Střižná mezera [mm]
v	Střižná vůle [mm]
s	Tloušťka stříhaného materiálu [mm]
S	Střižná plocha [mm^2]
L	Délka střihu [mm]
c	Koeficient druhu stříhání [-]
k	Součinitel vlivů střihu [-]
λ	Úhel sklonu nože [°]
R_{ms}	Mez pevnosti ve střihu [MPa]
F_s	Střižná síla [N]
F_{max}	Maximální střižná síla [N]
F_{skl}	Střižná síla při střihu skloněnými noži [N]
a_p	Axiální hloubka řezu [mm]
a_e	Radiální hloubka řezu [mm]
f_z	Posuv na zub [mm]
n	Otáčky [ot/min]
v_c	Řezná rychlost [m/min]
R_z	Střední hloubka drsnosti [μm]
A	Elektrický proud [A]
P	Výkon [W]

Seznam obrázků

Obrázek 1: Zploštění koncové části torzní tyče [2] 15
Obrázek 2: Schéma stabilizačního systému [1] 15
Obrázek 3: Upevnění nástrojů v lisovacím zařízení 16
Obrázek 4: Založení dílu 17
Obrázek 5: První zdvih beranu 17
Obrázek 6: Druhý zdvih beranu 17
Obrázek 7: Fáze průběhu stříhání [4] 18
Obrázek 8: Vliv střižné mezery na kvalitu střižné plochy [6] 19
Obrázek 9: Silové působení u střihu s rovnoběžnými noži [6] 19
Obrázek 10: Spodní matrice 21
Obrázek 11: Svrchní matrice 21
Obrázek 12: Střižný nůž 22
Obrázek 13: Průběh zbytkového napětí pro frézovací hlavu s VBD [13] 24
Obrázek 14: Průběh zbytkového napětí pro monolitní frézu [13] 24
Obrázek 15: Princip technologie HFM [15] 25
Obrázek 16: Tvorba třísky a řezných sil při HFM [16] 26
Obrázek 17: Rozdíl v přístupu konvenčního a HEM frézování [20] 28
Obrázek 18: Princip trochoidního frézování [19] 28
Obrázek 19: Rozdíl v tloušťce třísky při zachování stejného posuvu na zub [23] 30
Obrázek 20: Tloušťka třísky po korekci řezných podmínek [23] 30
Obrázek 21: Střižný nůž - konvenční metoda, strategie pro vnější obvod 33
Obrázek 22: Střižný nůž - konvenční metoda, strategie pro tvarovou část 33
Obrázek 23: Střižný nůž - vysokoposuvové frézování, strategie pro vnější obvod 34
Obrázek 24: Střižný nůž - vysokoposuvové frézování, strategie pro tvarovou část 34
Obrázek 25: Střižný nůž - trochoidní frézování, strategie pro vnější obvod 35
Obrázek 26: Střižný nůž - trochoidní frézování, strategie pro tvarovou část 35
Obrázek 27: Spodní matrice - vysokoposuvové frézování, strategie pro vnější obvod 38
Obrázek 28: Spodní matrice - trochoidní frézování, strategie pro vnější obvod 38
Obrázek 29: Alzmetall GS 800/5 [26] 39
Obrázek 30: Blohm REDLINE S [27] 40
Obrázek 31: AgieCharmilles AC Progress VP3 [28] 41
Obrázek 32: Carl Zeiss ScanMax [29] 42
Obrázek 33: Konvenční metoda - hrubování hlavních rozměrů 44
Obrázek 34: Konvenční metoda - hrubování tvarového vybrání 44

Obrázek 35: Konvenční metoda - stav obrobku po hrubování 45
Obrázek 36: Vysokoposuvové frézování - stav obrobku po hrubování 46
Obrázek 37: Trochoidní frézování - hrubování hlavních rozměrů 47
Obrázek 38: Trochoidní frézování - stav obrobku po hrubování 47
Obrázek 39: Spodní matrice - konvenční metoda 48
Obrázek 40: Spodní matrice - konvenční metoda, stav obrobku po hrubování 48
Obrázek 41: Spodní matrice - vysokoposuvové frézování, stav obrobku po hrubování 49
Obrázek 42: Spodní matrice - trochoidní frézování 50
Obrázek 43: Spodní matrice - vysokoposuvové frézování, stav obrobku po hrubování 50
Obrázek 44: Spodní matrice - stav po dokončovacích operacích frézování 52
Obrázek 45: Svrchní matrice – průběh elektroerozivního drátového řezání 53
Obrázek 46: Svrchní matrice - stav po elektroerozivním drátovém řezání 53
Obrázek 47: Analýza současného stavu - trhliny 54
Obrázek 48: Analýza současného stavu - opotřebení vnější řezné hrany 55
Obrázek 49: Spodní matrice před testováním – vnitřní otvor 56
Obrázek 50: Topografie vnitřního střižného otvoru před opotřebením– spodní matrice 57
Obrázek 51: Graf příčného profilu vnitřního střižného otvoru před opotřebením – spodní matrice 57
Obrázek 52: Graf drsnosti povrchu v okolí vnitřní střižné hrany 57
Obrázek 53: Topografie vnitřního střižného otvoru před opotřebením – svrchní matrice 58
Obrázek 54: Opotřebení po 3 000 ks - spodní matrice, detail 58
Obrázek 55: Opotřebení po 3 000 ks - spodní matrice 59
Obrázek 56: Opotřebení po 3 000 ks - svrchní matrice 59
Obrázek 57: Opotřebení po 6 000 ks - spodní matrice 60
Obrázek 58: Opotřebení po 6 000 ks - spodní matrice, detail 60
Obrázek 59: Opotřebení po 27 000 ks - spodní matrice 61
Obrázek 60: Opotřebení po 27 000 ks - spodní matrice, detail 61
Obrázek 61: Topografie vnitřního střižného otvoru po opotřebení – spodní matrice 62
Obrázek 62: Graf příčného profilu vnitřního střižného otvoru po opotřebení – spodní matrice 62
Obrázek 63: Opotřebení po 27 000 ks - svrchní matrice 63
Obrázek 64: Topografie vnitřního střižného otvoru po opotřebení – svrchní matrice 63
Obrázek 65: Porovnání průběhu střižné síly a velikosti práce [6] 67
Obrázek 66: Úprava konstrukce střižníku [5] 67
Obrázek 67: Úprava řezné hrany [38] 69
Obrázek 68: Schématická konfigurace LSP 70

Obrázek 69: Návrh ošetření spodní matrice pomocí LSP 71
Obrázek 70: Střižný nůž - graf srovnání strojních časů dávky 73
Obrázek 71: Spodní matrice - graf srovnání strojních časů dávky 74
Obrázek 72: Svrchní matrice - graf srovnání strojních časů dávky 75
Obrázek 73: Graf srovnání strojních časů dávky 75
Obrázek 74: Graf srovnání výrobních nákladů dávky 76

Seznam tabulek

Tabulka 1: Chemické složení W360 [10] 21
Tabulka 2: Chemické složení 1.3395 [11] 22
Tabulka 3: Alzmetall GS800/5 Technické parametry [26] 39
Tabulka 4: REDLINE S Technické parametry [27] 40
Tabulka 5: AC Progress VP3 Technické parametry [28] 41
Tabulka 6: Parametry nástroje - konvenční metoda [30] 43
Tabulka 7: Použité řezné podmínky - konvenční metoda 43
Tabulka 8: Parametry nástroje - vysokoposuvové frézování [31] 45
Tabulka 9: Použité řezné podmínky - vysokoposuvové frézování 45
Tabulka 10: Parametry nástroje - trochoidní frézování [32] 46
Tabulka 11: Použité řezné podmínky - trochoidní frézování 47
Tabulka 12: Spodní matrice - konvenční metoda, použité řezné podmínky 48
Tabulka 13: Spodní matrice - vysokoposuvové frézování, použité řezné podmínky 49
Tabulka 14: Spodní matrice - trochoidní frézování, použité řezné podmínky 49
Tabulka 15: Parametry nástroje - broušení [33] 51
Tabulka 16: Použité řezné podmínky - dokončování spodní matrice 51
Tabulka 17: Parametry nástroje - dokončení spodní matrice [32] 51
Tabulka 18: Střižný nůž - srovnání nasazených technologií frézování 72
Tabulka 19: Střižný nůž - úspora 72
Tabulka 20: Spodní matrice - srovnání nasazených technologií frézování 73
Tabulka 21: Spodní matrice - úspora 73
Tabulka 22: Svrchní matrice - srovnání nasazených technologií frézování 74
Tabulka 23: Svrchní matrice - úspora 74
Tabulka 24: Úspora výrobních nákladů vlivem LSP 77

1 Úvod

Pro výrobní podnik, jehož cílem je obecně maximalizace zisku, je podstatné zvyšování produktivity výrobních procesů za cílem dosažení právě co nejvyšších zisků vůči nákladům. V současné době velkého konkurenčního prostředí, kdy je velkým rizikem, že daný produkt bude dříve či později někdo jiný schopen vyrábět rychleji a zároveň za nižší cenu, je pozornost soustředěna obzvlášť na zvyšování produktivity výroby. Pro udržení dostatečné úrovně konkurenceschopnosti je v zájmu výrobního podniku zavádět opatření, kterými onoho zvyšování produktivity dosáhne. Příkladem takovýchto opatření může být zavádění progresivních technologií obrábění, u kterých je snaha zvyšováním řezných podmínek dosáhnout snížení výrobních nákladů. Produktivita zároveň souvisí i s životností výrobního nástroje, kdy prodloužením doby, po kterou je nástroj schopen vyrábět, dochází ke zvýšení množství vyrobených kusů a tím pádem i k růstu zisku.

Změna v životnosti výrobního nástroje je nejcitelnější především v oblasti sériové výroby, kde se každé její další výrazné zvýšení odráží na celkovém zisku podniku. Obzvlášť, pokud se jedná o výrobu pomocí specializovaných nástrojů určených pro jeden konkrétní výrobní účel. Výroba takovýchto nástrojů se v závislosti na složitosti jejich konstrukce musí v některých případech poptávat v podnicích, které k takto specializované výrobě oplývají dostatečným strojovým parkem. To se samozřejmě odráží na výsledné ceně takového produktu, která je pak důvodem pro co nevyšší využití takto specializovaného a nákladného nástroje.

Zadání této práce bylo řešeno pro společnost působící v oblasti automotive. Tato společnost se mimo jiné zabývá výrobou stabilizátorů, při které dochází k procesům tváření a stříhání pomocí nástrojů, u kterých je, pro výše zmíněné důvody, žádoucí zvyšování jejich životnosti. Zároveň tato společnost, díky specializované dílně (nástrojárna), oplývá možností vlastní výroby takovýchto nástrojů. Zde vznikla myšlenka prozkoumání vlivu výrobní technologie na výslednou životnost konečného produktu, v tomto případě výrobního nástroje.

Řešení tohoto zadání se bude skládat ze dvou částí. První část bude věnována výrobě tří výrobních nástrojů, v rámci které budou u každého z nástrojů nasazeny tři různé technologie výroby. Ve druhé části bude ve výrobním provozu provedeno testování životnosti těchto nástrojů. V průběhu testování bude zároveň sledován průběh a charakter opotřebení nástrojů. Na základě výsledků testování bude vyhodnocen vliv použitých technologií výroby na výslednou životnost výrobních nástrojů. V rámci samotné výroby nástrojů budou pro zjištění případné ekonomické výhodnosti srovnány nasazené technologie výroby. V samotném závěru budou na základě výsledků testování provedeny návrhy pro další zvýšení životnosti nástrojů.

Pro vnitřní předpisy společnosti nelze v této práci uvádět konkrétní názvy, jména či místa. Zároveň charakteristika určitých výrobních procesů bude popsána pouze v obecné rovině z důvodu ochrany know-how podniku.

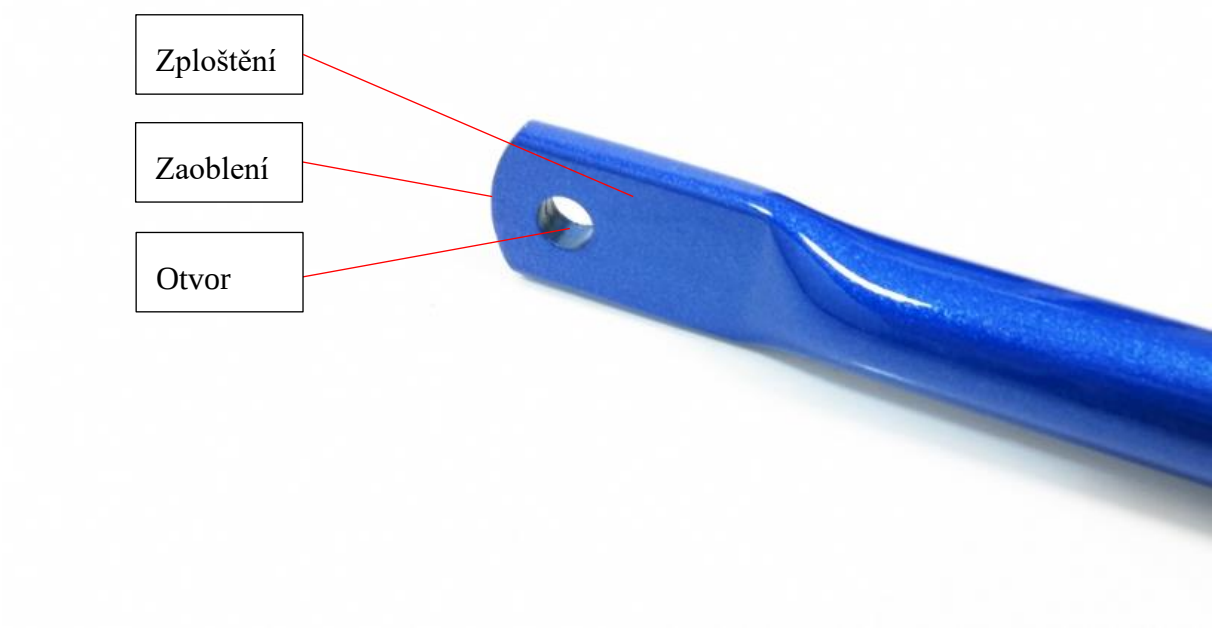
1.1 Úvod do problematiky

Technologický proces výroby je obecně spojován se vznikem povrchových zbytkových napětí v obrobku. Ta mohou působit příznivě, či být naopak škodlivá, což může mít svůj vliv na výslednou životnost výrobního nástroje. Vznikl tedy předpoklad, že nasazením různých výrobních technologií v průběhu výroby nástrojů může dojít ke změně charakteru povrchových zbytkových napětí, což by mohlo mít vliv na jejich samotnou životnost. Použité výrobní technologie budou nasazeny při operaci frézování. Bude se jednat o technologii vysokoposuvového frézování, technologii trochoidního frézování a frézování s využitím rohové frézy. Již v úvodu je nutné zmínit, že v průběhu řešení tohoto zadání se postupně vytrácel význam zjišťování vlivu zmíněných výrobních technologií na životnosti vyrobených nástrojů. Pozornost se tedy v závěru práce přesunula k nalezení takové výrobní technologie, jejíž realizací by byla naplněna původní myšlenka zadání.

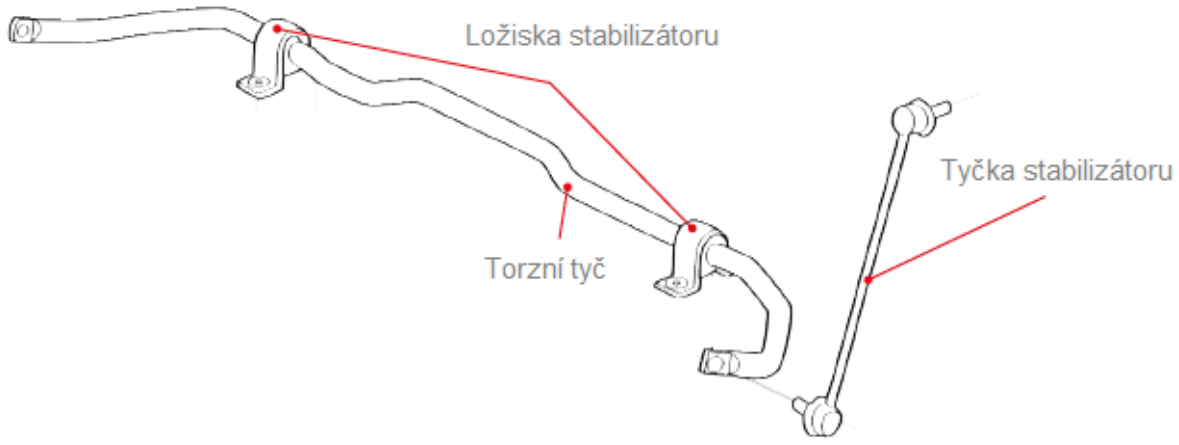
2 Charakteristika vybraných výrobních nástrojů

Pomocí výrobních nástrojů dochází v lisovacím zařízení k výrobě požadovaného tvaru koncové části torzní (zkrutné) tyče stabilizátoru. Tento tvar lze charakterizovat třemi prvky, kterými jsou zploštění, otvor a zaoblení konce tyče, viz. Obrázek 1. Výrobní proces požadovaného tvaru se skládá z tváření koncové části tyče na „zploštělý“ tvar a stříhání otvoru spolu se zaoblením konce tyče. Celý vyráběný tvar bude pro jednoduchost nazýván jako „zploštění“. Podrobnější vysvětlení výrobního procesu zploštění bude popsáno v následující podkapitole.

Pro lepší pochopení významu vyráběného zploštění v rámci vyššího celku je uvedeno schéma stabilizačního systému, viz. Obrázek 2. Zploštění slouží k namontování tyček stabilizátoru, které torzní tyč spojují se vzpěrami zavěšení, případně s příčnými rameny. Torzní tyč je pak uložená v gumových ložiskách a celý stabilizační systém je většinou namontován na pomocném rámu. [1]



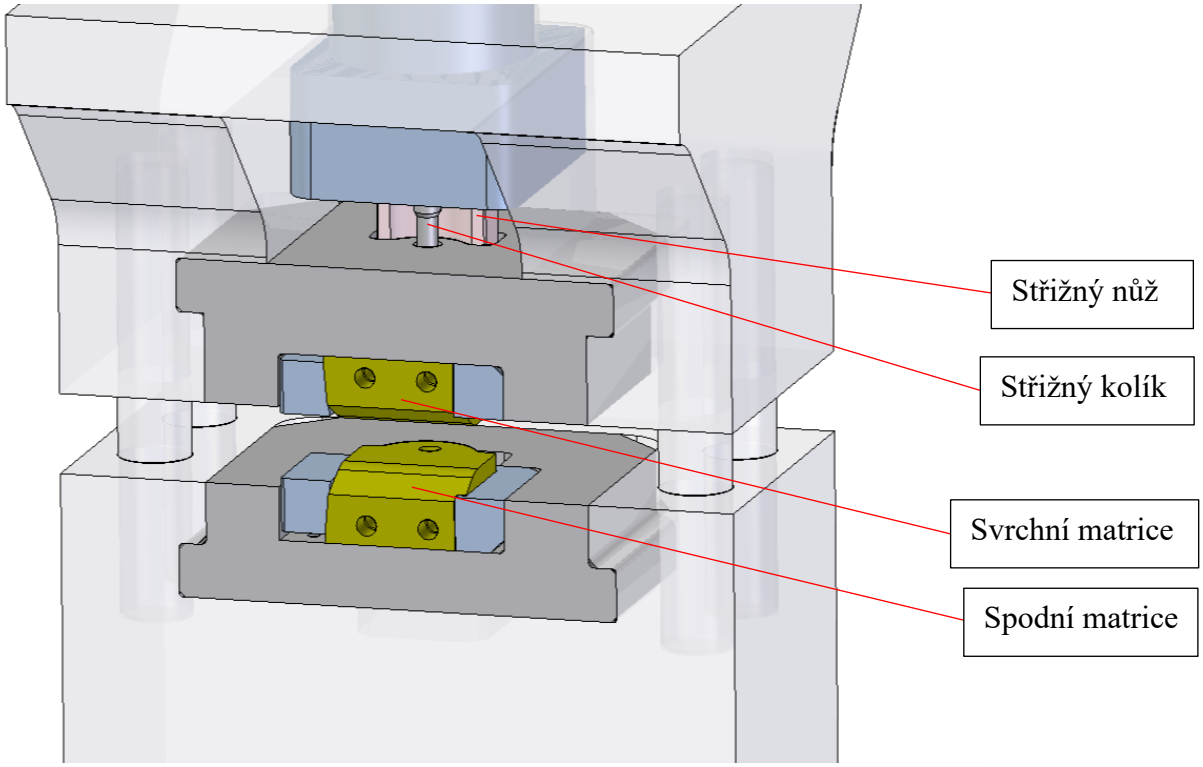
Obrázek 1: Zploštění koncové části torzní tyče [2]



Obrázek 2: Schéma stabilizačního systému [1]

2.1 Charakteristika výrobního procesu

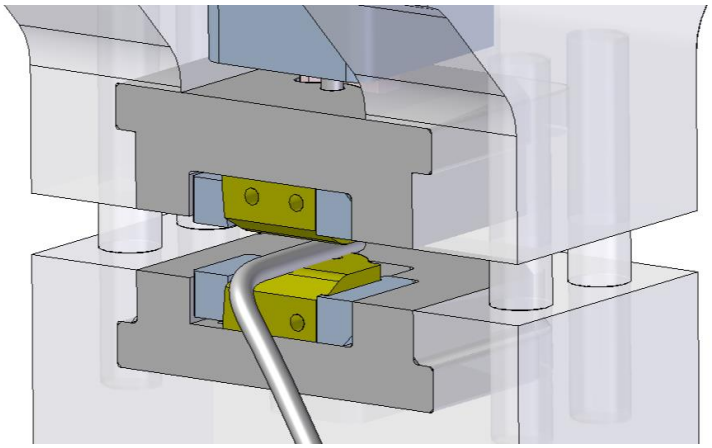
Výroba zploštění probíhá v lisovacím zařízení. Pracovní prostor se skládá z nepohyblivého stolu, ve kterém je ve vložce upevněna spodní matrice, a beranu, ve kterém jsou obdobně upevněny svrchní matrice, střižný nůž a střižný kolík. Pár matric, svrchní a spodní matrice, slouží k tváření vyráběného zploštění. Matrice jsou zároveň vybaveny prvky s ostrými hranami ke stříhání otvoru a stříhání zaoblené části konce torzní tyče. Ke stříhání otvoru dál slouží střižný kolík, ke stříhání koncového zaoblení pak střižný nůž.



Obrázek 3: Upevnění nástrojů v lisovacím zařízení

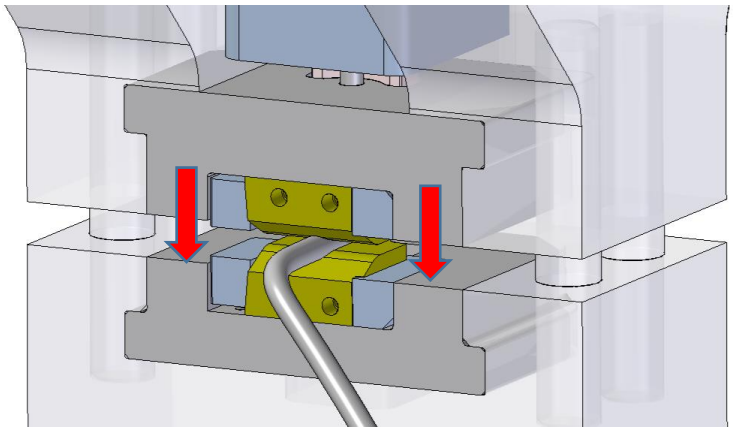
Materiálem torzní tyče je bórová ocel s označením 34MnB5. Ocel je charakteristická tvářitelností a vysokou pevností po tepelném zpracování. Bór je v materiálu obsažen v řádech tisícin hmotnostního procenta, což je předností této oceli. V tomto množství je bór schopen v průběhu kalení vytvrzovat strukturu nízkouhlíkových a nízkolegovaných ocelí až k hodnotám meze pevnosti 1 800 MPa. S tím úměrně stoupají i parametry meze kluzu a tvrdosti. Při nadměrné koncentraci bóru se však prokalitelnost oceli snižuje. Účinek bóru je pak závislý i na obsahu uhlíku v oceli. S rostoucím množstvím uhlíku účinnost bóru klesá. Nejlepší prokalitelnosti je dosahováno u nízkouhlíkových a nízkolegovaných ocelí s obsahem uhlíku 0,10 – 0,35 hmotnostního procenta. U vyšších hodnot uhlíku účinnost bóru klesá až do obsahu 1,6 hmotnostního procenta uhlíku, kdy jeho účinnost zcela zaniká. Díky svým vlastnostem nachází tato ocel využití mimo jiné v automobilovém průmyslu při výrobě součástí podvozku a dílů majících význam bezpečnosti. [3]

Pro lepší pochopení funkce jednotlivých nástrojů a výroby zploštění bude v jednotlivých krocích popsán proces výroby zploštění. Nejdříve je do prostoru mezi svrchní a spodní matrici vkládána koncová část torzní tyče, viz. Obrázek 4. Před samotným založením tyče do pracovního prostoru lisu jsou nejprve oba její konce indukčně ohřívány na teplotu požadovanou pro následný výrobní proces.



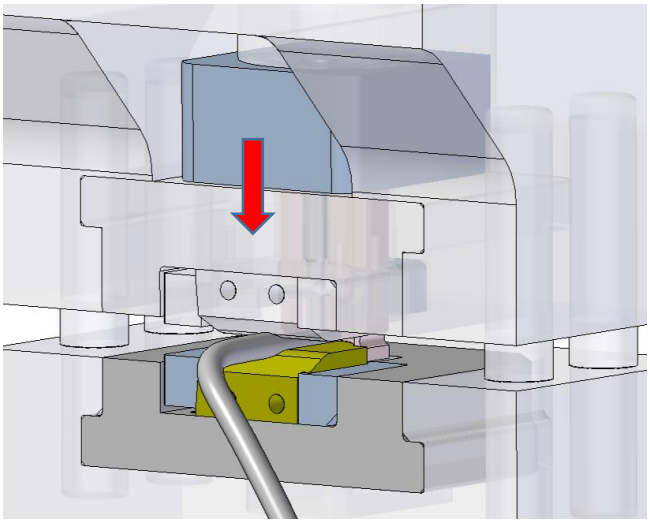
Obrázek 4: Založení dílu

Po založení konce tyče do pracovního prostoru dochází na první zdvih beranu ke tváření materiálu pomocí tvářecích ploch matric.



Obrázek 5: První zdvih beranu

Následně na druhý zdvih beranu dochází ke stříhání otvoru pomocí střižného kolíku a souběžně i ke střihu převislého konce tyče pomocí střižného nože.



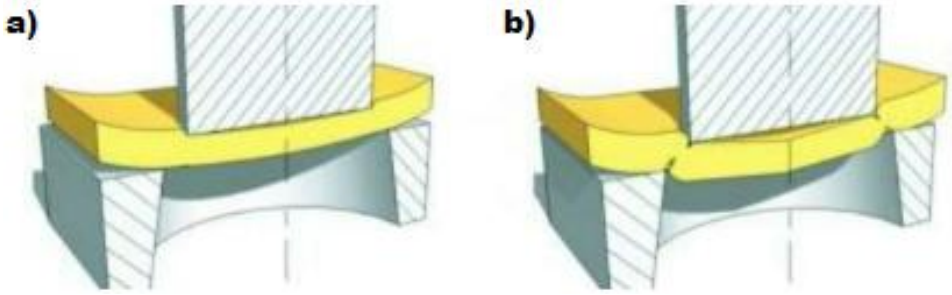
Obrázek 6: Druhý zdvih beranu

Po navrácení lisovacího zařízení do počáteční polohy dojde k vyjmutí již vyrobeného zploštění, otočení torzní tyče o 180°, založení neopracovaného konce tyče, a výrobní proces je opakován.

2.1.1 Technologie tváření – stříhání

Stříhání je nejčastěji používanou operací technologie tváření. Stříháním se rozumí proces oddělování částic materiálu smykovým působením dvojice nástrojů (střižníku a střižnice) podél křivky střihu. Stříhání lze dělit podle různých hledisek. Dle polotovaru na technologii objemového stříhání (tyče, trubky) nebo technologii plošného stříhání (zejména plechů). Podle teploty procesu lze rozlišovat stříhání za studena (měkčí oceli, plechy) nebo za tepla (tlustší a tvrdší materiály). Na základě konstrukce střižných nástrojů je možné odlišovat stříhání rovnoběžnými, šikmými, kruhovými noži apod. V rámci plošného stříhání se rozlišují základní operace, jako prosté stříhání, děrování, vystřihování a další. Přehled názvosloví základních střižných operací uvádí norma ČSN 22 601. [4] [5]

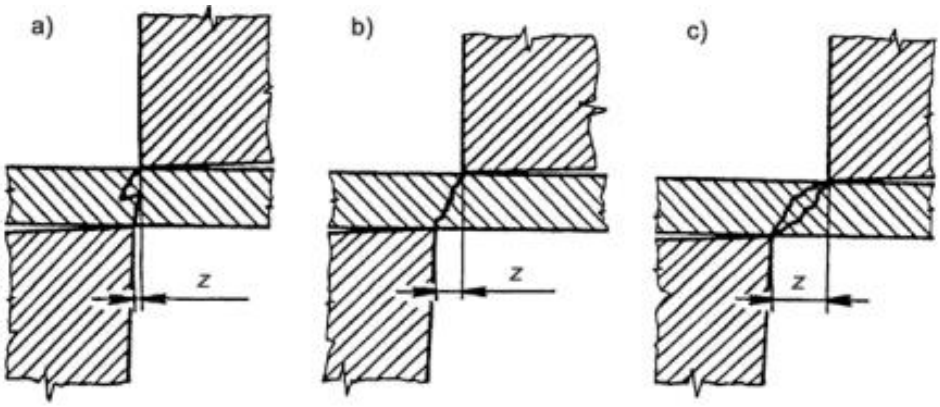
Průběh střižného procesu lze, od dosednutí střižného materiálu na stříhaný materiál, rozdělit do tří fází. První fázi charakterizuje vznik pružných deformací ve stříhaném materiálu, který je silově namáhán na ploše mezi obvodem střižníku a střižnice. Stříhaný materiál je namáhán ohybem od silových dvojic, které vznikají v rovinách kolmých ke střižným plochám. Stříhaný materiál se deformací po stranách střižníku a střižnice ohýbá, viz. Obrázek 7 (a). Ve druhé fázi dochází u stříhaného materiálu k překročení meze kluzu a ke vzniku plastických deformací. V poslední třetí fázi dochází k namáhání materiálu nad mez pevnosti ve střihu R_{ms}. Podél hran střižníku a střižnice vznikají trhliny, které se rozšiřují až do oddělení materiálu, viz. Obrázek 7 (b). [4]



Obrázek 7: Fáze průběhu stříhání [4]

Podstatný vliv na jakost střižné plochy, velikost střižné síly a trvanlivost nástroje má tzv. střižná mezera *z*. Jedná se o polovinu střižné vůle *v*, což je hodnota rozdílu rozměrů pracovních částí střižníku a střižnice. Vhodně zvolenou velikostí střižné mezery je zaručeno, že dojde ke správnému usmýknutí stříhaného materiálu. Při optimálně zvolené velikosti střižné mezery je dosaženo požadované jakosti střižné plochy při nejmenší střižné síle. V závislosti na druhu a tloušťce stříhaného materiálu se velikost střižné mezery volí v rozmezí 3 – 20 % tloušťky stříhaného materiálu. [6]

Obrázek 8 zobrazuje vliv střižné mezery na kvalitu střižné plochy. V případě malé nebo velké mezery (a, c) se vzniklé trhliny míjejí a na střižné ploše vzniká nerovný povrch. Při použití optimální vůle (b) se vzniklé trhliny od střižníku a střižnice setkají ve stejném místě a vytváří se střižná plocha požadované jakosti. Norma ČSN 22 6015 udává velikost střižné mezery pro různé materiály v závislosti na jejich tloušťce. [4]



Obrázek 8: Vliv střižné mezery na kvalitu střižné plochy [6]

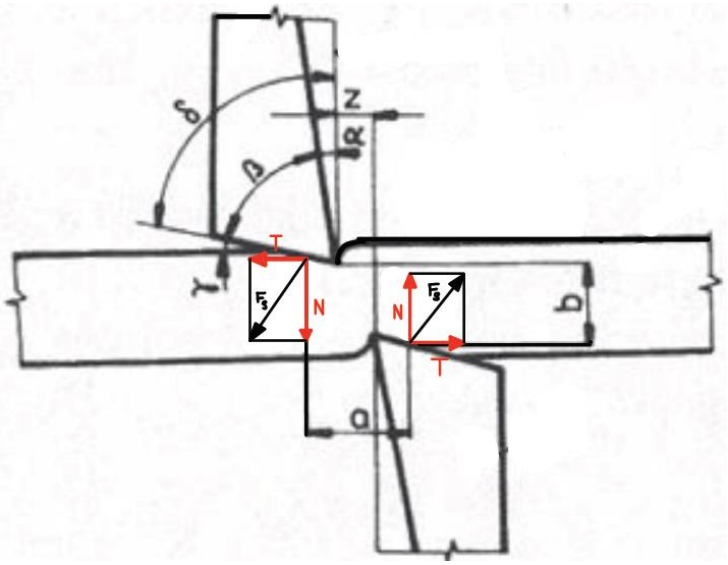
Velikost střižné mezery je možné získat také výpočtem. V případě plošného stříhání pro materiály tloušťky nad 3 mm platí vztah: [6]

$$z = (1{,}5 \cdot c \cdot s - 0{,}015) \cdot \sqrt{0{,}1 \cdot R_{ms}} \tag{1}$$

kde c – koeficient závislý na druhu střihání (volí se v rozmezí 0,005 – 0,035),
c = 0,005 pro dosažení kvalitního povrchu střižné plochy,
c = 0,035 pro dosažení minimální střižné síly,
s – tloušťka plechu (mm),
R_{ms} - pevnost materiálu ve střihu (MPa):

$$R_{ms} = (0{,}75 \div 0{,}85) \cdot R_m \tag{2}$$

Pro návrh nástrojů, volbu stroje a obecně správný návrh celého technologického procesu stříhání, je potřebná znalost střižných sil, které vznikají působením dvojice střižných nástrojů. V reálných podmínkách střižného procesu je potřeba uvažovat, že nedochází pouze k čistému smyku, ale v důsledku vnějších vlivů působí při střihu namáhání kombinovaná. Dále střižné síly nepůsobí v průběhu střižného procesu pouze v jedné rovině, ale vlivem střižné mezery dochází ke vzniku ohybových momentů. Výsledná střižná síla F_s se rozkládá na složku třecí T a normálovou N, a přes ramena a, b působí ohybovými momenty na nástroje a střižený materiál, viz. Obrázek 9. [4] [6]



Obrázek 9: Silové působení u střihu s rovnoběžnými noži [6]

Pro výpočet střižné síly je potřebná hodnota střižné plochy:

$$S = L \cdot s \tag{3}$$

kde L - délka střihu (střižný obvod) (mm),
s - tloušťka stříhaného materiálu (mm).

Na základě této znalosti je možné přejít k výpočtu maximální střižné síly neboli nejvyšší hodnoty střižné síly v průběhu celého procesu:

$$F_{max} = S \cdot R_{ms} \cdot k \tag{4}$$

kde k - součinitel zahrnující vlivy, které zvyšují střižnou sílu (zvětšení střižné mezery opotřebováním nožů, otupení řezných hran, seřízení nástroje). Volí se v rozmezí 1,25 - 1,5. [6]

2.2 Spodní matrice

Jedná se o spodní díl z dvojice tvářecích nástrojů, viz. technický výkres DP - 010. Společně s protikusem (svrchní matrice) tvaruje zakončení zkrutné tyče na požadovaný „zploštělý“ tvar. Nástroj je vybaven kanálky pro chlazení s otvory s trubkovým závitem G 1/4" ke spojení fitinky. Svrchní tvářecí plocha nástroje je na jedné straně vybavena tvarovým prvkem s ostrou hranou o poloměru R 29,5 ±0,02 mm, který společně se střižným nožem slouží ke střihu zaoblení konce zkrutné tyče. Na opačné straně tvářecí plochy je vytvořen tangenciální přechod pod úhlem 30°. Posledním prvkem sloužícím k výrobě zploštění je otvor Ø 11,9 H7 / Ø 14 mm. Díra Ø 11,9 H7 je na svrchní tvářecí ploše nástroje taktéž vybavena ostrou hranou a v kombinaci se střižným kolíkem slouží k výrobě vnitřního otvoru zploštění. Pro dosažení patřičné kvality povrchu zploštění je svrchní funkční strana nástroje leštěna na hodnotu drsnosti Rz = 1 μm.

Nástroj je vakuově kalen na hodnotu 56+2 HRc a deponován tenkou vrstvou CrAlSiN. Vrstva je deponována fyzikální metodou PVD. Dodavatel doporučuje vrstvu pro aplikace náročné na oxidační odolnost a odolnost vůči nalepování obráběného materiálu na nástroj. Z doporučených oblastí aplikací vrstvy jsou pro popisovaný nástroj důležité oblasti lisování a tváření. [7]

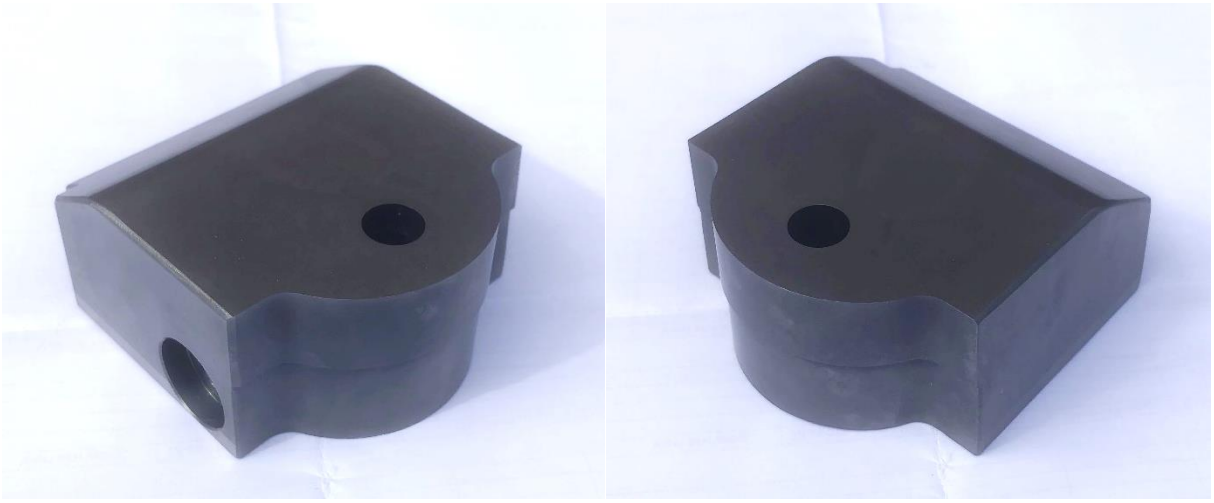
Napříč různými možnostmi tenkých vrstev jsou nitridové povlaky považovány za účinnou ochrannou vrstvu díky dobrým otěruvzdorným a korozivzdorným vlastnostem. Příkladem takového povlaku je nitrid chromu. Výzkumem bylo zjištěno, že přidáním dalšího prvku, jako například hliníku, je možné dále zlepšit mechanické vlastnosti a chemickou stálost povlaku. Atomy hliníku mohou obsazovat pozice atomů chromu v mřížce CrN a tímto zpevňováním zlepšovat tvrdost a otěruvzdornost tenké vrstvy. Vrstva CrAlN vykazuje vysokou tvrdost a tepelnou stálost společně s výbornou odolností vůči oxidaci. Snahou o další zdokonalení povlaku byl zkoumán vliv křemíku ve vrstvě CrAlN, kdy byl učiněn závěr, že legováním CrAlN křemíkem dochází ke znatelné změně velikosti zrna, fázového složení a mechanických vlastností vrstvy. Bylo zjištěno, že křemík podél hranic zrna segreguje v amorfní látku. Účinkem křemíku je dále zvyšována otěruvzdornost povlaku a odolnost vůči oxidaci. Díky svým chemickým a mechanickým vlastnostem je vrstva CrAlSiN navržena pro použití při opotřebení řezného nástroje za vysokých teplot. [8] [9]

Materiálem nástroje je nástrojová ocel pro práci za tepla s označením W360. Jedná se o ocel s vysokou tvrdostí (52 – 57 HRC), která byla vyvinuta speciálně k aplikacím lisování za

vyšších teplot a pro nástroje k zápustkovému kování. Kromě vysoké tvrdosti za vyšších teplot ocel vyniká velmi vysokou otěruvzdorností, houževnatostí, dobrou obrobitelností, homogenní strukturou a velmi dobrou odolností proti popouštění. Zároveň je ocel dobře leštitelná a materiál je možné bez většího rizika chladit vodou. [10]

Tabulka 1: Chemické složení W360 [10]

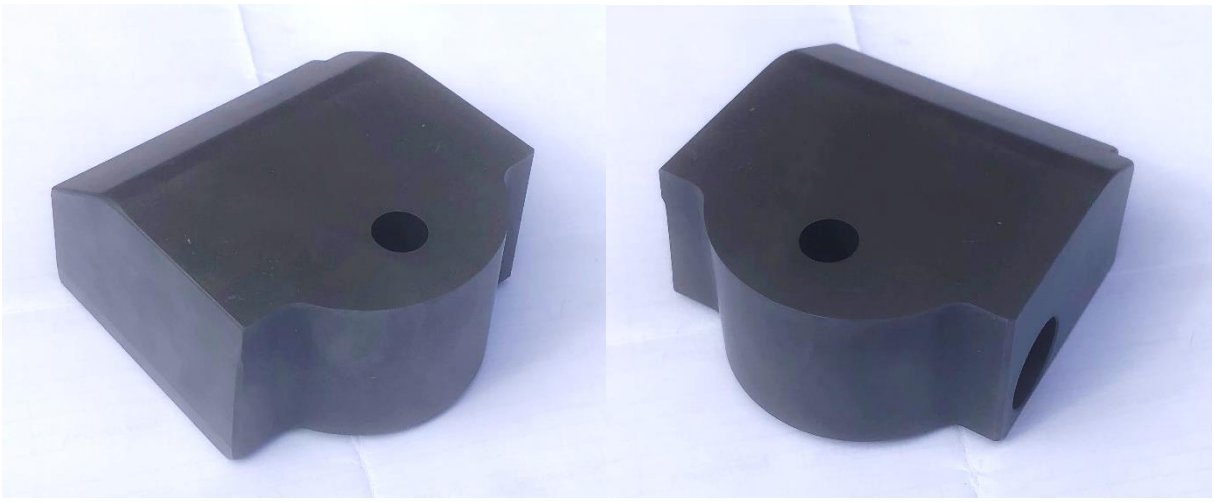
C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Mo [%]	V [%]
0,50	0,20	0,25	4,50	3,00	0,60



Obrázek 10: Spodní matrice

2.3 Svrchní matrice

Horní díl z dvojice lisovacích nástrojů, viz. technický výkres DP – 020, je téměř identický k předchozímu popisovanému nástroji. Odlišný je poloměr tvarové části R 30 ±0,02 mm, sloužící k dosažení požadovaného rádiusu zaoblení. Průchozí díra pro střižný kolík má po celé délce jednotný průměr Ø 11 H7 a slouží především k vedení střižného kolíku. Obdobně jako u matrice se na svrchní funkční ploše nacházejí prvky s ostrými hranami, tedy tvarové zaoblení R 30 ±0,02 mm a otvor Ø 11 H7. Materiál nástroje a povrchová úprava jsou taktéž stejné.



Obrázek 11: Svrchní matrice

2.4 Střižný nůž

Tento nástroj, viz. technický výkres DP – 030, slouží ke stříhání koncového zaoblení zkrutné tyče. Nástroj je na obou koncích vybaven ostrou hranou o poloměru R 30 ±0,02 mm. V pracovním cyklu se využívá vždy jen jedna střižná hrana nástroje. Po jejím otupení je možné nástroj přeupnout otočením o 180° a využít neopotřebovanou střižnou hranu. Po obvodu nástroje se nachází čtyři otvory Ø 8,2 +0,1 mm. Tyto otvory slouží k uchycení kolíků, pomocí kterých je nástroj upevněn ve vložce výrobního zařízení.

Materiálem nástroje je vysoce legovaná rychlořezná ocel vyráběná metodou práškové metalurgie s označením 1.3395 dle německého standardu DIN. Základní charakteristikou této oceli je velmi vysoká otěruvzdornost v kombinaci s vysokou pevností v tlaku. Její použití je vhodné mimo jiné i pro řezné nástroje. Oproti konvenční rychlořezné oceli vyniká v obrobitelnosti, brousitelnosti a v rozměrové stálosti po tepelném zpracování. Proces výroby metodou práškové metalurgie zajišťuje vysokou čistotu materiálu s malým množstvím vnitřních strukturních vad. Ocel kromě zmíněných vlastností dále oplývá dobrou houževnatostí, a prokalitelností, díky čemuž je vhodnou volbou k aplikaci na konkrétním řezném nástroji. [11]

Tabulka 2: Chemické složení 1.3395 [11]

C [%]	Cr [%]	W [%]	Mo [%]	V [%]
1,30	4,20	6,40	5,00	3,10

Obrázek 12: Střižný nůž

3 Aplikovatelnost progresivních technologií obrábění na vybrané nástroje

Nasazení progresivních metod obrábění je v obecnosti realizováno za účelem zvyšování produktivity obrábění, a tedy maximalizaci zisku podnikání. Uplatňování těchto produktivnějších technologií obrábění souvisí zejména s ekonomickými aspekty výroby, kdy největšího snížení výrobních nákladů dosáhneme především zvýšením řezných podmínek, zejména řezné rychlosti, posuvu a hloubky řezu, a spolu s tím snížením řezných sil a tepelného ovlivnění obrobku. Cílem progresivních metod obrábění je tedy dosažení velkého úběru materiálu, a to při současném zvýšení kvality obrobku a, zejména u hrubování, dosažení optimální trvanlivosti břitu nástroje. S kvalitativním hlediskem souvisí mimo jiné integrita povrchu, kde jsou podstatným faktorem povrchová zbytková napětí. [12]

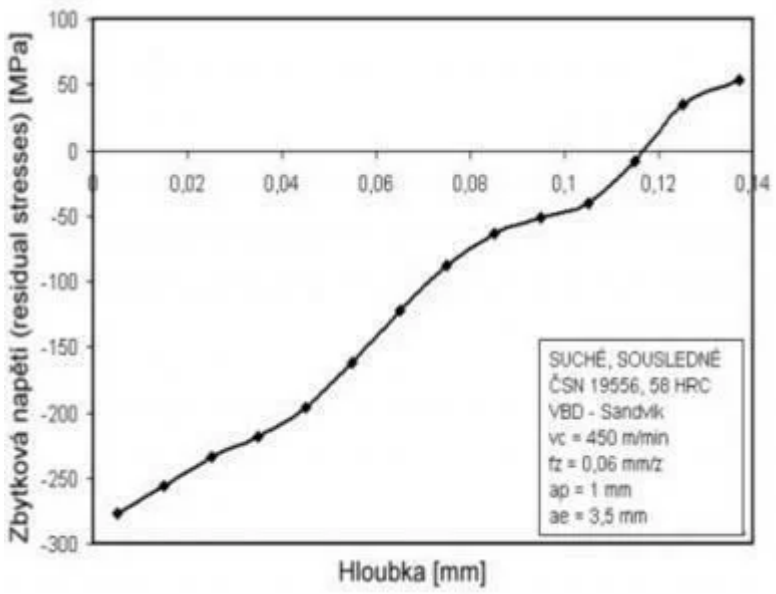
Za zbytková napětí jsou považována taková napětí, která se v materiálu vyskytují bez působení vnějšího zatížení. Vznik těchto napětí je spojen s technologickými procesy výroby. Obecně je uvažováno, že zbytková tlaková napětí jsou příznivá, a tahová zbytková napětí jsou naopak neprospěšná z důvodu napomáhání vzniku a šíření trhlin. Vesměs je žádoucí vyhýbat se vysokým hodnotám zbytkových napětí z důvodu tvarových deformací a degradaci pevnostních charakteristik materiálu. [12]

Jak bylo zmíněno, důvodem vzniku zbytkových napětí je působení technologického procesu výroby, který je schopen v materiálu vyvolat plastickou deformaci a zároveň materiál tepelně ovlivnit. Závislost zbytkových napětí na zvolených řezných podmínkách byla v minulosti experimentálně zkoumána katedrou technologie obrábění, FST, ZČU v Plzni, společně s Nové Technologie – Výzkumné centrum, ZČU v Plzni. Řezné podmínky byly zvoleny tak, aby byla u obráběného materiálu dosažena oblast vysokorychlostního režimu obrábění. Experiment byl proveden pomocí dvou obráběcích nástrojů určených k dokončovacím operacím. Jednalo se o frézovací hlavu Sandvik Coromant pro kruhovou VBD a monolitní kulovou frézu Rübig. Monolitní nástroj i VBD byly řezného průměru 12 mm, vyrobeny ze slinutého karbidu a deponovány vrstvou TiNAl. Zkušebním obrobkem byla nástrojová ocel pro výrobu forem a zápustek ČSN 19 556, tepelně zpracována na 58 HRc. Zbytková napětí byla měřena odvrtávací metodou, kdy byl do materiálu vyvrtán otvor malých rozměrů do hloubky 0,5 – 1,5 mm. K měření zbytkového napětí bylo využito příslušné zařízení vybavené tenzometrickou růžicí. V průběhu experimentu byla měřena tlaková zbytková napětí v blízkosti povrchu materiálu. K vyhodnocení vlivu řezných podmínek na zbytkovém napětí byly zvoleny dvě charakteristiky – maximální tlakové napětí R_{-max} vztažené k mezi kluzu materiálu $R_{p0,2}$ a hloubka zvratu h_z, ve které dochází ke změně tlakových zbytkových napětí na tahové.[13]

Při experimentu s použitím frézovací hlavy s VBD bylo pro závislost maximálního tlakového napětí na řezných podmínkách zjištěno, že zbytkové tlakové napětí se zvyšuje s rostoucí axiální hloubkou řezu a hodnotou posuvu. Nárůst radiální hloubky řezu a řezné rychlosti má opačný vliv. Při použití monolitního nástroje bylo experimentálně zjištěno, že na růst tlakového zbytkového napětí má vliv pouze rostoucí radiální hloubka řezu, zbylé parametry mají opačný charakter působení. Na základě výsledků bylo možné prohlásit, že při obrábění materiálu nástrojem s VBD jsou maximální zbytková tlaková napětí vyšší než při použití monolitního nástroje. [13]

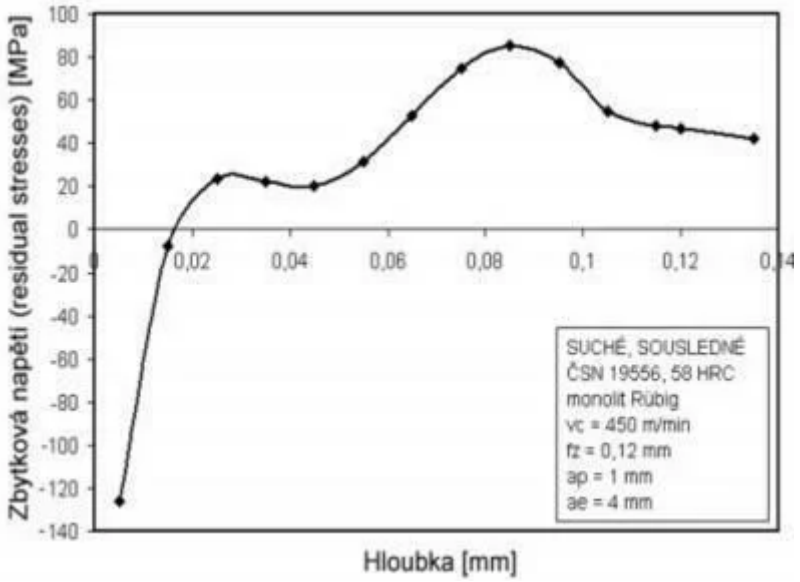
Při zkoumání hloubky zvratu, kde se tlakové zbytkové napětí mění na napětí tahové, bylo u obou nástrojů zjištěno, že vliv na růst hloubky zvratu má pouze nárůst radiální hloubky řezu. Z průběhu charakteristiky závislosti zbytkového napětí na hloubce, viz. Obrázek 13**.** je patrné, že při použití frézovací hlavy s VBD byly pod povrchem obrobku naměřeny vyšší hodnoty

zbytkového napětí blížící se hodnotě 300 MPa. Změna hodnoty napětí v závislosti na hloubce má pozvolný průběh. Tlakové napětí přechází v tahové v hloubce necelých 0,12 mm. [13]



Obrázek 13: Průběh zbytkového napětí pro frézovací hlavu s VBD [13]

Při obrábění monolitním nástrojem byly u obrobku výsledky měření podstatně odlišné, viz. Obrázek 14. Zbytkového napětí dosáhlo přibližně polovičních hodnot s maximem okolo 130 MPa. Změna napětí v závislosti na hloubce má podstatně prudší charakter, kdy tlakové napětí přechází v tahové již v hloubce necelých 0,02 mm pod povrchem. [13]



Obrázek 14: Průběh zbytkového napětí pro monolitní frézu [13]

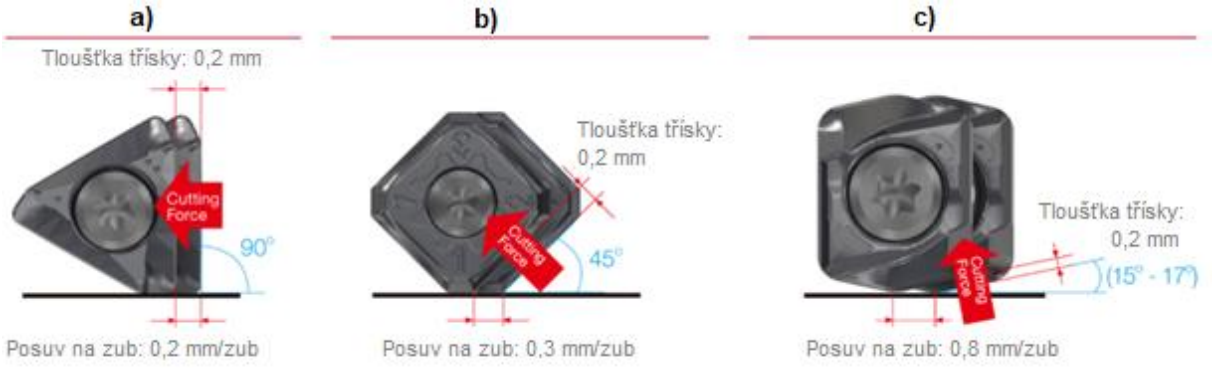
Závěrem bylo konstatováno, že z technologického hlediska se fréza s VBD jeví jako příznivější nástroj, zejména pro pozvolnější změnu velikosti zbytkových napětí. [13]

V rámci zadání této práce budou progresivní technologie aplikovány v průběhu hrubovacích operací při procesu frézování. Je předpokládán určitý dopad použité výrobní technologie na vlastnosti obráběného materiálu a výslednou životnost součásti. Dopad progresivní technologie obrábění a volby výrobního nástroje na integritu obrobeného povrchu potvrzuje i výše představený výzkum. I přesto, že kvalitu povrchové vrstvy nejvíce ovlivňuje poslední výrobní operace, je pravděpodobné, že určitý vliv mohou zanechat i předchozí operace. Kromě kvalitativních hledisek jsou důvodem aplikace progresivních technologií i ekonomické aspekty výroby. Zde je cílem, zvláště při hrubovacích operacích, dosáhnout velkého úběru materiálu, zkrácení doby výroby a snížení výrobních nákladů.

V následujících podkapitolách budou charakterizovány srovnávané výrobní technologie.

3.1 Vysokoposuvové frézování

Název vychází z anglického high-feed milling, označované zkratkou HFM. Je využíváno k dosažení vysokého úběru materiálu, zvýšení produktivity obrábění a s tím spojeným snížením pracovní doby cyklu pro jednotlivý obrobek. Technologie využívá kombinace malé axiální hloubky řezu, relativně velké radiální hloubky řezu a velmi malého úhlu nastavení hlavního ostří K_r. Díky tomu převážná část řezných sil směřuje axiálně k vřeteni stroje. To dovoluje nastavení několikanásobně (až 10x) vyšších rychlostí posuvu oproti konvenčním metodám frézování. [14] Princip metody je znázorněn níže, viz. Obrázek 15.



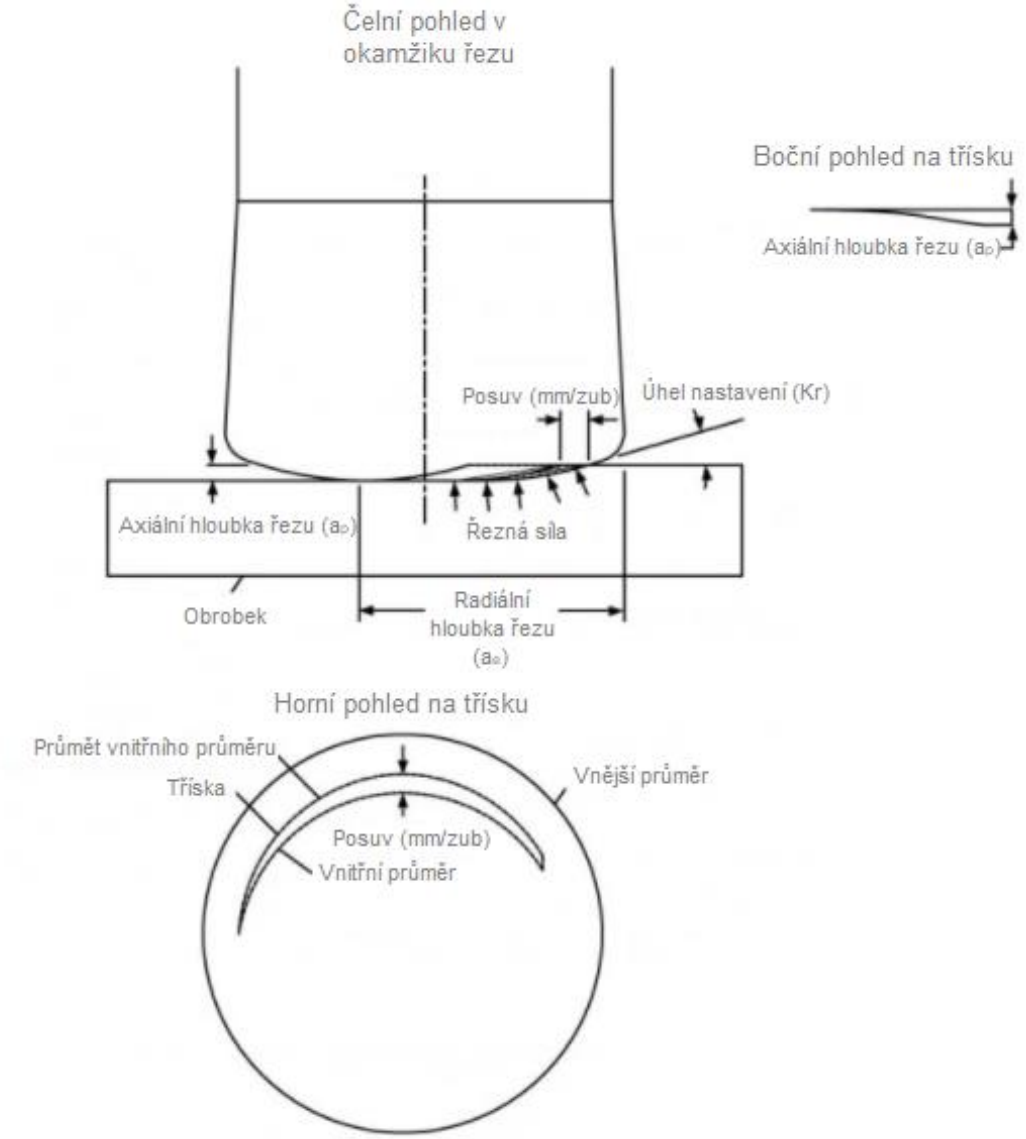
Obrázek 15: Princip technologie HFM [15]

Základem metody HFM je snaha o ztenčování třísky v závislosti na úhlu nastavení hlavního ostří K_r. Nástroj s $K_r = 90°$ nemá pro ztenčování třísky žádný přínos, jelikož při posuvu 0,2 mm/zub se tvoří tříska tloušťky 0,2 mm (a). V případě nástroje s $K_r = 45°$ se při posuvu necelých 0,3 mm/zub tvoří taktéž tříska tloušťky 0,2 mm, což umožňuje další zvýšení posuvu a snížení doby obrábění (b). Poslední obrazec znázorňuje výrazně menší K_r v rozmezí 15-17°. Při posuvu necelých 0,8 mm/zub se tvoří taktéž tříska tloušťky 0,2 mm, je možné dále zvyšovat posuv a dobu obrábění je možné snížit o 50 % a více (c). [15]

Velikost úhlu nastavení hlavního ostří určuje také směr působení výslednice řezných sil. Při použití $K_r = 90°$ bude generována řezná síla, která bude působit kolmo k ose nástroje, v důsledku čehož bude na nástroj vytvářen velký tlak (a). Ve druhém případě bude na nástroj řezná síla působit pod úhlem 45° (b). V posledním případě bude působení výslednice řezných sil téměř rovnoběžné s osou nástroje a síla je tedy směřována „zpět“ do vřetena (c). Na nástroj tedy nepůsobí tak velké zatížení, což je jednou z předností technologie HFM. [15] Působení řezné síly na nástroj a tvorba třísky při využití HFM jsou dále ilustrovány, viz. Obrázek 16.

Zde je znovu viditelné, že díky malému úhlu nastavení hlavního ostří v kombinaci s malou axiální hloubkou řezu dochází k přenosu velké části řezných sil „vzhůru“ podél osy nástroje.

Schéma zároveň ilustruje vzniklou třísku. Z bočního pohledu je patrné, že tříska se ztenčuje směrem ke středové ose nástroje. To je dáno profilem spodní hrany nástroje, který je tvarovaný právě za účelem tvorby tenké třísky. Kvůli tomuto ztenčování třísky je zvýšení hodnoty posuvu potřebné k tomu, aby fréza zůstávala aktivně zapojená v řezu a nedocházelo pouze k jejímu tření o obrobek. Tím by docházelo ke zvyšování teploty v místě řezu a předčasnému opotřebení nástroje. Nastavení malé axiální hloubky řezu je podstatné proto, aby řezný proces probíhal právě podél zakřivené hrany spodního profilu nástroje. [16]



Obrázek 16: Tvorba třísky a řezných sil při HFM [16]

Využití technologie HFM je výhodné zejména v situacích, kdy je vyžadováno velké vyložení nástroje, které je již ze své podstaty nestabilní. Výhodou HFM je zmíněné směřování velké části řezných sil „zpět“ směrem k vřeteni stroje. To má za následek stabilnější chod procesu obrábění. U jiných způsobů frézování je vyšší pravděpodobnost tvorby většího množství radiálních sil, které by měly za následek chvění, vibrace, vychylování nástroje z místa řezu a případně jeho následné selhání. [16]

Konstrukce fréz určených k vysokorychlostnímu obrábění je odlišná od běžných frézovacích nástrojů. Úhel nastavení hlavního ostří K_r se pohybuje v rozmezí 10–20°. To

napomáhá zmíněné tvorbě tenké třísky a umožňuje vyšší hodnoty posuvu oproti konvenčním nástrojům. Dalším rozdílem je velký rádius rohu nástroje, který v kombinaci s malou hloubkou řezu taktéž napomáhá vytvářet tenkou třísku, čímž je následně umožněn vyšší posuv. [17]

Spektrum možností nasazení technologie HFM je poměrně široké. Je to metoda hrubování až středního dokončování, která nalézá využití u většiny běžně používaných operací frézování. Příkladem mohou být čelní frézování, hrubování složitých tvarových ploch nebo frézování kapes a otvorů do plného materiálu. [18]

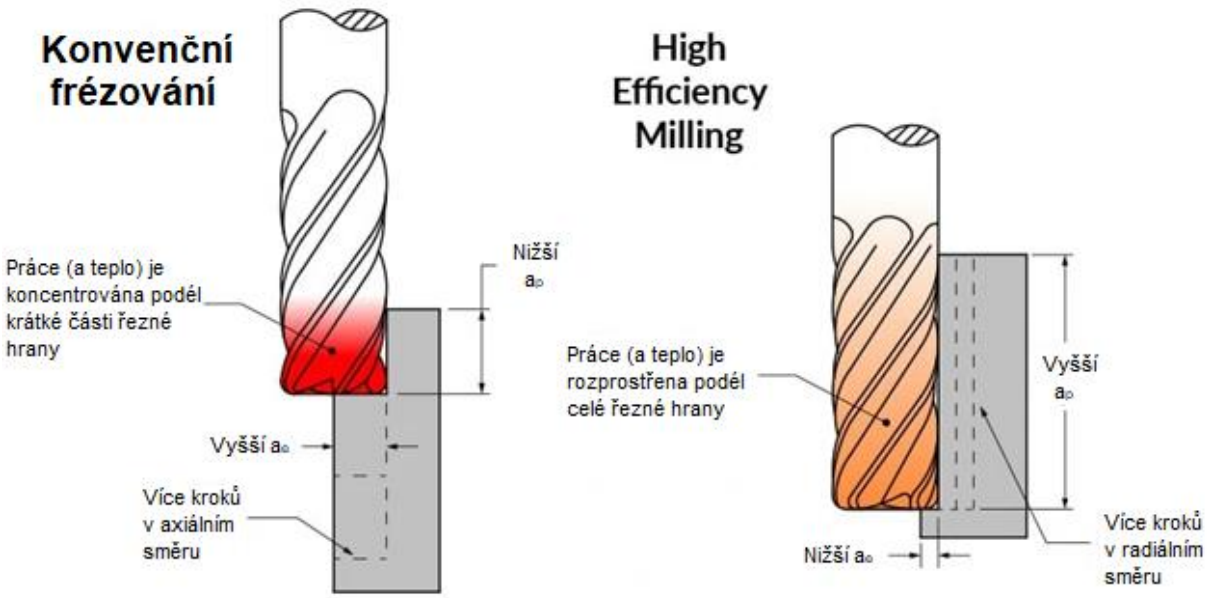
Výhodou nasazení metody HFM jsou i její technickoekonomické dopady na proces obrábění. Hrubováním pomocí této technologie se snižuje množství energie vynaložené na výrobní proces, na rozdíl od metod, které k odebrání stejného množství materiálu využívají větší hloubky řezu a nižší posuvy. Další výhodou je ve většině případů poměrně malé zatížení nástroje během procesu obrábění, při kterém mezi nástrojem a obrobkem nevzniká tak velké množství tepla, které by bylo potřeba odvádět pomocí chladících kapalin či emulzí. Obrábět je možné i za sucha, čímž lze ušetřit na použití a obnově chladicích kapalin a zároveň tak i přispět ke zlepšení ekologie výrobního procesu a minimalizaci negativních dopadů jak na životní prostředí, tak i na prostředí výrobního závodu a zdraví zaměstnanců. Zmiňované malé silové zatížení nástroje, a tím pádem i dalších prvků soustavy SNOP, má pozitivní dopad na spolehlivost výrobního procesu. Nástroje nejsou i při dlouhém vyložení tolik náchylné k vibracím, díky čemuž se zvyšuje trvanlivost jejich ostří. Tím se zároveň snižují frekvence kontroly opotřebení nástroje a časy potřebné k výměně nástrojů v průběhu zpracování výrobní dávky. V průběhu obrábění technologií HFC vznikají poměrně tenké a krátké třísky, které lze z místa řezu snadno odstraňovat, nejlépe např. ofukováním využitím stlačeného vzduchu. [18]

3.2 Trochoidní frézování

Technologie trochoidního frézování byla původně vyvinuta za účelem hrubování až středního dokončování těžce obrobitelných materiálů. Primární využití nalézá při obrábění drážek, obzvlášť pak v situacích, kdy je potřeba vytvořit drážku širší, než je průměr samotného nástroje. Používá se také při aplikacích, kde je vyšší riziko náchylnosti k vibracím. [19]

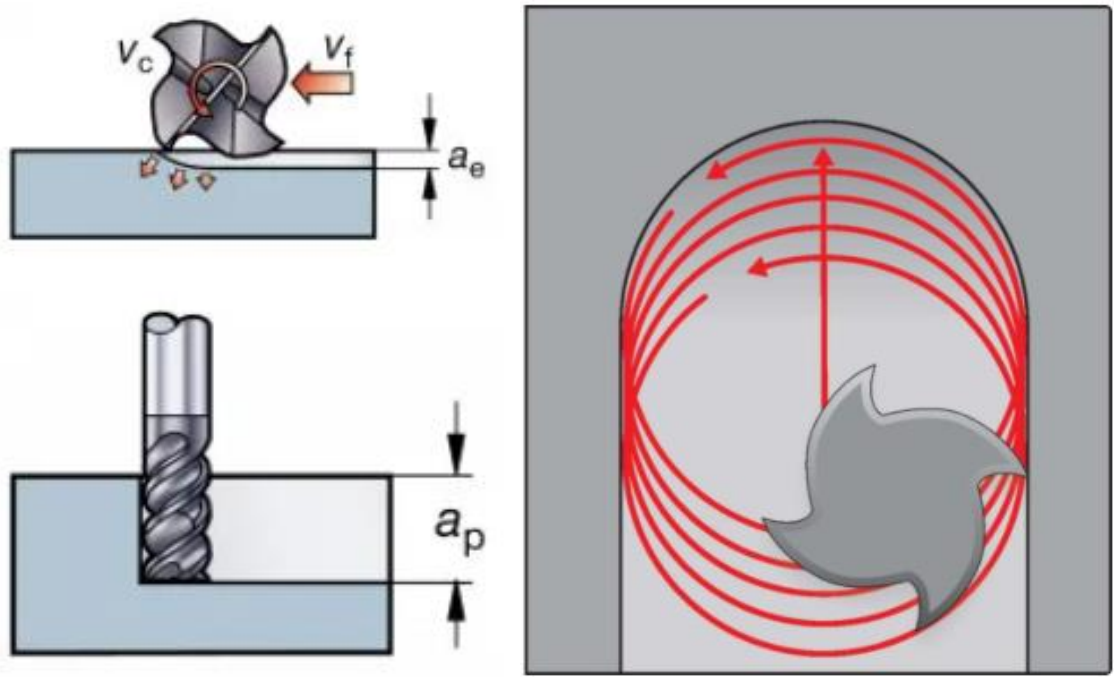
Technologie spadá do kategorie High Efficiency Milling (HEM), v doslovném překladu Vysoko účinné frézování. Principem HEM je kombinace malé radiální hloubky řezu a_e a zároveň velké axiální hloubky řezu a_p. Opotřebení nástroje je tak rovnoměrné po celé délce jeho řezné části, zároveň je po celé délce nástroje rovnoměrněji rozptýlené i teplo vznikající v řezu. Tímto se snižují šance na selhání nástroje. Naproti tomu konvenční strategie frézování běžně pracují s vysokou radiální hloubkou řezu a_e a nízkou axiální hloubkou a_p. Následkem toho se teplo vzniklé v řezu koncentruje do malé oblasti řezné části nástroje, čímž se v těchto místech urychluje opotřebení. Popsané rozdíly znázorňuje Obrázek 17. Zde je kromě výše zmíněného navíc patrné, že zatímco konvenční způsob frézování vyžaduje více kroků v axiálním směru, HEM naopak ve směru radiálním. [20]

Zmíněná kombinace axiální a radiální hloubky řezu má u HEM za následek, že je možné využít vyšších hodnot posuvu a řezné rychlosti, čímž se docílí většího úběru materiálu. Zvyšuje se tím pádem produktivita celého procesu. [21]



Obrázek 17: Rozdíl v přístupu konvenčního a HEM frézování [20]

Technologie trochoidního frézování je definována jako kombinace pohybu nástroje po kruhových drahách se současným dopředným pohybem nástroje, viz. Obrázek 18. Nástroj se v radiálním směru plynule pohybuje po spirálové dráze, přičemž opakovaně odebírá „plátky“ materiálu. Jinými slovy lze říci, že se jedná o řadu překrývajících se kruhových drah ve směru radiálního pohybu nástroje. [19]



Obrázek 18: Princip trochoidního frézování [19]

Pohyb po spirálové dráze a malá radiální hloubka řezu při trochoidním frézování mají v porovnání s čistě přímočarou dráhou nástroje při konvenčním obrábění své výhody, které souvisejí s již zmiňovanými principy HEM. V důsledku menších hodnot radiální hloubky řezu se snižuje množství tepla vznikajícího v řezu a zároveň jsou nižší i hodnoty řezných sil a zatížení vřetene. Menší velikost radiálního zatížení umožňuje vyšší přesnost výroby a dovoluje tak obrábět jemnější a přesnější prvky. Maximální hloubka řezu v radiálním směru by však neměla překračovat 20 % z průměru nástroje. [19] [22]

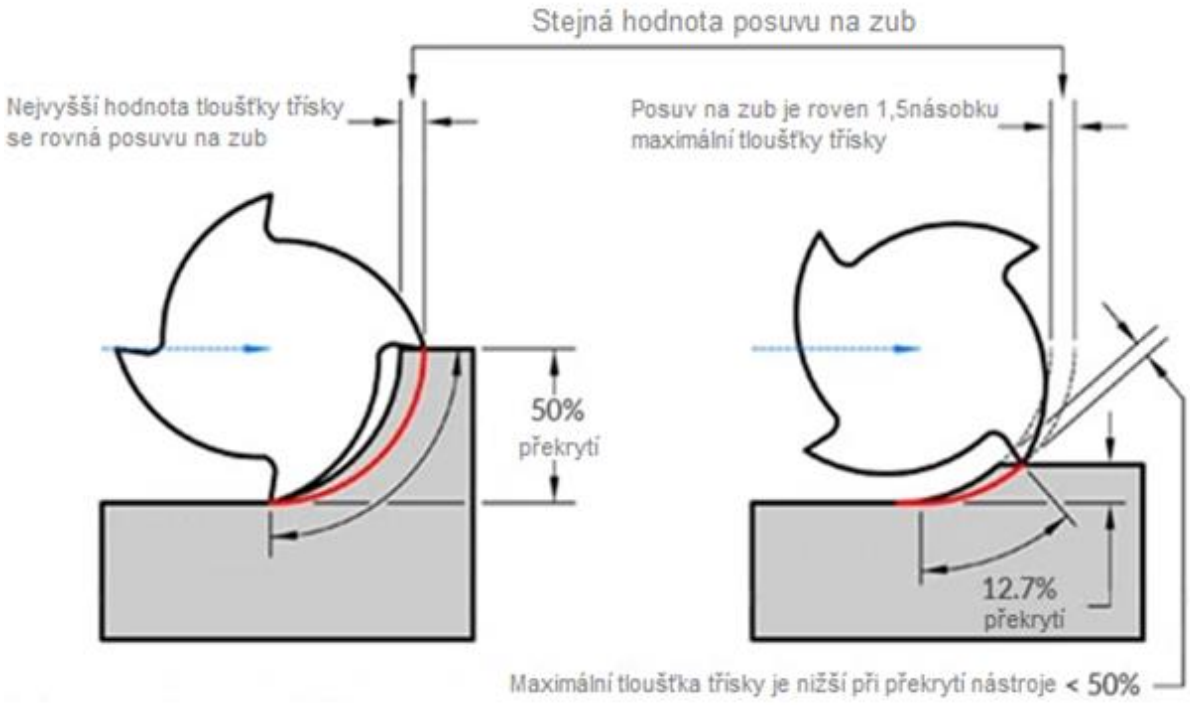
Dále vzhledem k nižší radiální hloubce řezu dovoluje trochoidní frézování vyšší axiální hloubku řezu, díky čemu je možné využít celou délku řezné části nástroje. Tím je zajištěno, že teplo a řezné síly vznikající v průběhu obrábění jsou rozložené rovnoměrněji podél nástroje, spíše, než aby byly koncentrovány v jeho jediné části. Nižší tepelné zatížení a rovnoměrnější opotřebení řezné části nástroje značně zvyšují jeho životnost. Díky nižšímu opotřebení nástroje je možné zvyšovat řezné podmínky procesu. Jelikož je možné využít nástroj v celé délce jeho řezné části, není potřeba jej v axiálním směru obrábění tak často zavádět do řezu. Zkracuje se tak doba výrobního cyklu. Využitím technologie trochoidního frézování je možné obrábět drážky širší, než je průměr samotného nástroje. Tím pádem je možné jeden stejný nástroj využít k vytvoření drážek rozličných rozměrů. [22]

Problémy při zavádění této technologie se běžně vyskytují v oblasti technické připravenosti, konkrétně na straně stroje a potřebného softwaru. K využití výhod, které trochoidní frézování nabízí, je zapotřebí, aby byl stroj schopen dosáhnout vysokých otáček a posuvů a zároveň byl schopen v průběhu pohybu nástroje po spirálové dráze nepřetržitě měnit hodnoty posuvu. Neschopnost stroje průběžně měnit hodnotu posuvu by měla za následek jev zvaný chip thinning („ztenčování třísky“), který je podrobněji popsán v následující podkapitole. K naprogramování dráhy nástroje a s tím souvisejících řezných podmínek, zejména často zmiňovaného proměnného posuvu, může být vyžadováno speciálního softwaru, například v podobě konkrétního modulu pro CAM software. [22]

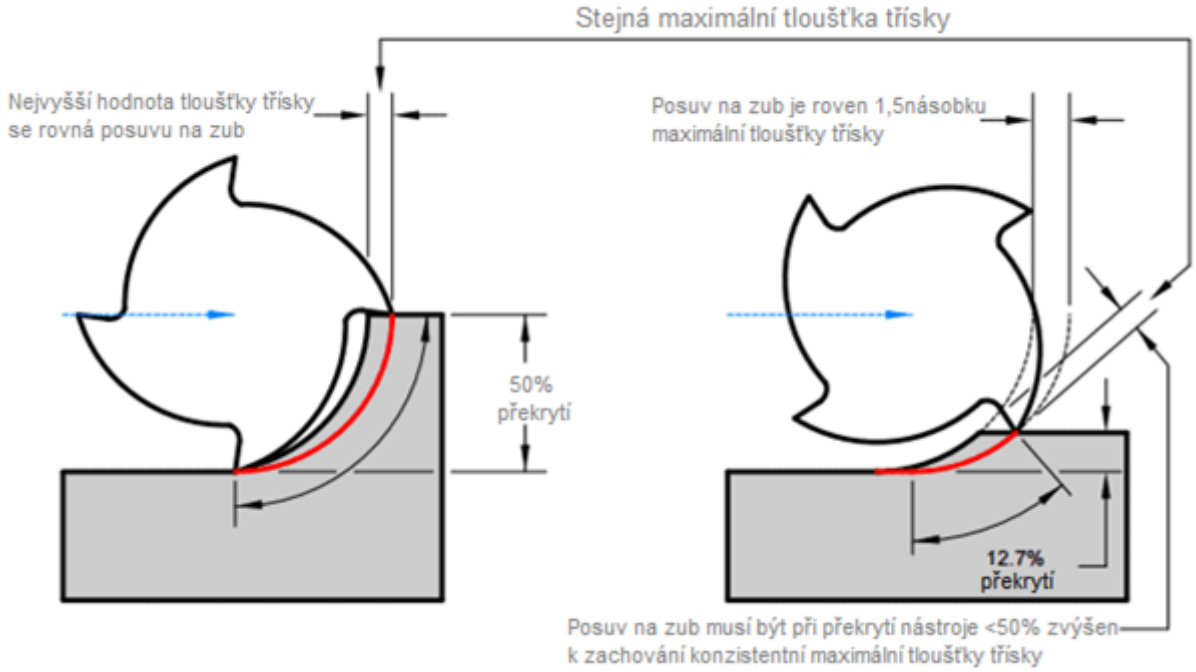
3.2.1 Chip thinning

Jedná se o jev, který vzniká při měnící se radiální hloubce řezu a souvisí s tloušťkou třísky a posuvem na zub. Tyto dvě hodnoty jsou proměnnými, které se vzájemně ovlivňují. Posuv na zub se přímo promítá do hodnoty posuvu samotného nástroje a je běžně udáván v milimetrech na zub f_z [mm/zub]. Tloušťka třísky odkazuje na skutečnou tloušťku každé jednotlivé třísky vzniklé od řezného nástroje a je měřena v místě největšího průřezu třísky. Tyto dvě proměnné by neměly být zaměňovány. [23]

Způsob, jakým k tomuto jevu dochází ilustruje Obrázek 19. Při nastavení 50 % překrytí průměru nástroje je tloušťka třísky rovna hodnotě posuvu na zub. Jednotlivé zuby nástroje vstupují do řezu pod pravým úhlem, čímž se dosahuje nejvyšší efektivity řezného procesu a maximálně se eliminuje nadměrné tření. Pokud překrytí klesá pod hodnotu 50 % průměru nástroje, zmenšuje se nejvyšší možná tloušťka třísky. To může vést ke zhoršené kvalitě obrobeného povrchu, menší časové efektivitě obráběcího cyklu a předčasnému opotřebení nástroje. Těmto problémům se může předejít vhodným nastavením řezných podmínek. Zvyšováním hodnoty posuvu na zub f_z se docílí konstantní tloušťky odebírané třísky při měnící se radiální hloubce řezu, jak ilustruje Obrázek 20. V důsledku toho je nástroj schopen pracovat co nejefektivněji s čímž souvisí nízké tření, vyšší úběr materiálu a delší životnost nástroje. [23]



Obrázek 19: Rozdíl v tloušťce třísky při zachování stejného posuvu na zub [23]



Obrázek 20: Tloušťka třísky po korekci řezných podmínek [23]

3.3 Rohové frézování

Použitím technologie rohového frézování vznikají dvě plochy zároveň, a to čelní plocha a k ní kolmo přilehlé lineární nebo tvarové stěny. Je tedy zapotřebí čelního frézování v kombinaci s frézováním obvodem. Jedním z nejdůležitějších požadavků této technologie je dosažení co nejpřesnějšího úhlu rohu 90°. [24]

Při nasazení této technologie je potřeba uvědomit si určité faktory, které mají vliv na proces obrábění. Řezná síla vznikající v průběhu obrábění působí zejména v radiálním směru, v důsledku čehož je vůči vřetenu stroje vytvářen relativně veliký ohybový moment. Vzniká tak vysoké riziko vibrací nástroje, což dále může vyústit v opotřebení a poškození upínače, případně samotného vřetena stroje. [25]

K rohovému frézování lze využít klasické přesné rohové frézy, taktéž ale i stopkové frézy, frézy s dlouhými břity, případně kotoučové frézy. Vzhledem k takovému počtu možností je pro optimální volbu podstatné zhodnotit veškeré požadavky na konkrétní operaci. [24]

Konvenční čelní frézy pro frézování do rohu jsou běžně schopné frézování téměř „přesných“ mělkých pravoúhlých osazení. Celá řada těchto fréz jsou univerzální nástroje, které lze využít i k výrobě děr. K výrobě osazení s horším přístupem do místa řezu je vhodné využít stopkové frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami, případně monolitní karbidové stopkové frézy. K frézování hlouběji umístěných osazení se obvykle využívá fréz s dlouhými břity. Frézy s dlouhými břity jsou dále dobrým řešením pro aplikace v obtížnějších podmínkách obrábění. Dosahují vysokých hodnot úběru materiálu a jsou všeobecně využívány pro hrubovací frézování. Tyto frézy však požadují dobrou stabilitu v řezu, dobrý stav vřetena, kvalitní upnutí a vyšší výkon stroje, jelikož v řezu vzniká značné radiální zatížení. [24]

Při aplikaci rohového frézování je vhodné řídit se určitými zásadami. Vzhledem k úhlu nastavení hlavního ostří $K_r = 90°$ je vhodné v první řadě volit sousledné frézování. V určitých případech může být nesousledné frézování vhodnou alternativou z důvodu směřování řezných sil proti opěrným plochám přípravku. U nástrojů s VBD je potřeba volit houževnatější karbidové břitové destičky. S rostoucí axiální hloubkou řezu je s ohledem na vibrace důležité snížení řezné rychlosti v_c. Při vzniku vibrací je kromě snížení v_c vhodné zvýšení hodnoty posuvu na zub f_z. K potlačení vibrací má zásadní význam plynulý vstup nástroje do záběru. Využitím techniky narolování nástroje do řezu po směru hodinových ručiček a udržením nepřetržitého záběru frézy je dosahováno malé tloušťky třísky na výstupu z řezu a snížení rizika vzniku vibrací. [24]

3.4 Vlastní aplikovatelnost progresivních technologií obrábění

Pro zvýšení produktivity obrábění spočívají v obecnosti progresivní technologie ve zvýšení řezných podmínek. S tím pak souvisí i zvýšení dynamiky procesu obrábění. K tomu je zapotřebí výrobních zařízení, které jsou schopny dosáhnout úrovně vysokorychlostního režimu obrábění. Takováto zařízení musí oplývat dostatečnými pohony, které umožní dosažení vysokých řezných rychlostí obrábění a zároveň i rychlých dynamických změn směru pohybu nástroje. S těmito požadavky souvisí i podmínka vysoké tuhosti konstrukce výrobního zařízení. Společnost, ve které bude výroba nástrojů probíhat, oplývá strojovým parkem, který umožňuje nasazení těchto technologií výroby. Samotná aplikace progresivních technologií obrábění bude popsána v kapitolách 4, 5, které se věnují návrhu a realizaci výroby konkrétních nástrojů s použitím zmiňovaných technologií obrábění. Součástí návrhu technologie výroby bude i popis použitých výrobních zařízení.

4 Návrh technologie výroby

Kapitola se zabývá návrhem technologie výroby dříve představených výrobních nástrojů. Návrh technologie výroby popisuje sled výrobních operací, případně se podrobněji zabývá průběhem vybraných úseků dané operace. Návrhy technologie výroby jednotlivých nástrojů jsou doplněny o výrobní postupy neboli průvodky, viz. volně vložená příloha. Použité výrobní stroje a jejich parametry jsou uvedeny v podkapitole 4.4. Detailnější popis výroby včetně použitých výrobních nástrojů, případně řezných podmínek, bude uveden v kapitole 5.

4.1 Střižný nůž

Proces výroby začne na pracovišti pili nařezáním polotovaru. Rozměry výsledného polotovaru budou 75 x 35 x 152 mm. Následovat bude operace frézování na obráběcím centru ALZMETALL GS800/5. Zde budou provedeny výrobní úseky hrubování a následně i dokončování příslušných tvarových ploch nástroje na konečný rozměr. Hlavní rozměry tloušťky, šířky a délky vyráběné součásti budou dokončeny s předepsaným přídavkem pro broušení.

Polotovar bude upnut za rozměr 75 mm. Frézování začne operací zarovnání čela obrobku. Následovat bude vrtání čtyř otvorů průměru 8,2 mm hotově. Další operací bude hrubování obvodu součásti, tzn. rozměrů délky 147 ±0,2 mm a šířky 62 -0,02/-0,05 mm, a následně i tvarové plochy o poloměru R 30 ±0,2 mm oboustranně a tvarové plochy s odlehčením 0,5 mm o poloměru R 30,5 mm v délce 97 mm.

Při operaci hrubování nastane změna ve volbě výrobního nástroje v závislosti na použití progresivní technologie obrábění. Pro každou z technologií, tedy konvenční metody s využitím rohového frézování, vysokoposuvového frézování a trochoidního frézování, bude při hrubování obrobku využito nástroje potřebného k nasazení příslušné výrobní technologie. V této fázi budou tedy výrobní procesy odlišné. Bližší popis těchto hrubovacích úseků operace bude uveden v příslušné podkapitole, věnující se zvoleným strategiím vedení nástroje.

Po hrubování bude výrobní proces pokračovat sražením hran 1x45° oboustranně po celé délce vyráběné součásti. Následovat budou dokončovací operace. Nejprve budou obrobeny obvodové rozměry 147 ±0,2 mm a 62 -0,02/-0,05 mm s přídavkem 0,4 mm pro broušení. Poté oboustranně tvarová část o poloměru R 30 ±0,2 mm již hotově na konečný rozměr. Poslední operací provedenou při prvním upnutí bude dokončení tvarové plochy s odlehčením R 30,5 mm v délce 97 mm.

V této fázi výrobního procesu bude tvar nástroje téměř dokončen. Bude zbývat pouze odstranit přídavek potřebný pro první upnutí. Po přeupnutí obrobku za obrobený rozměr 62 mm bude přídavek odebrán zarovnáním současné čelní plochy na rozměr 25 -0,02/-0,05 mm s přídavkem 0,4 mm pro broušení.

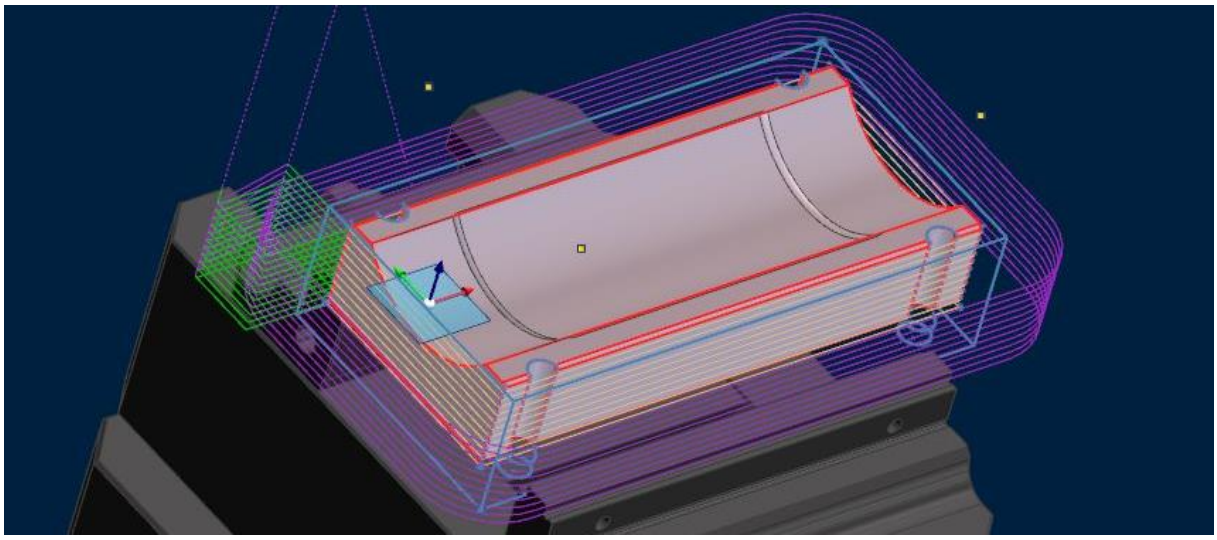
Po frézování budou následovat operace odjehlení pro odstranění otřepů a překážejících ostrých hran vzniklých po předchozím frézování za použití pneumatické brusky a příslušné technické frézy. Obrobek bude pro následnou identifikaci označen popisovacím zařízením na nefunkční ploše dle výrobního výkresu. Následně bude nástroj zakalen na příslušnou hodnotu tvrdosti 65+2 HRc uvedenou v razítku výkresu.

Zakalená součást bude dokončena finální operací broušení na rovinné brusce Blohm REDLINE S. Zde budou odebrány přídavky zbylé po frézování obrobku, tj. hlavní rozměry výšky, šířky a délky. V poslední fázi bude na již vyrobeném nástroji pomocí měřicí stanice zkontrolována přesnost výroby požadovaných rozměrů a tolerancí dle výrobního výkresu.

4.1.1 Hrubovací strategie

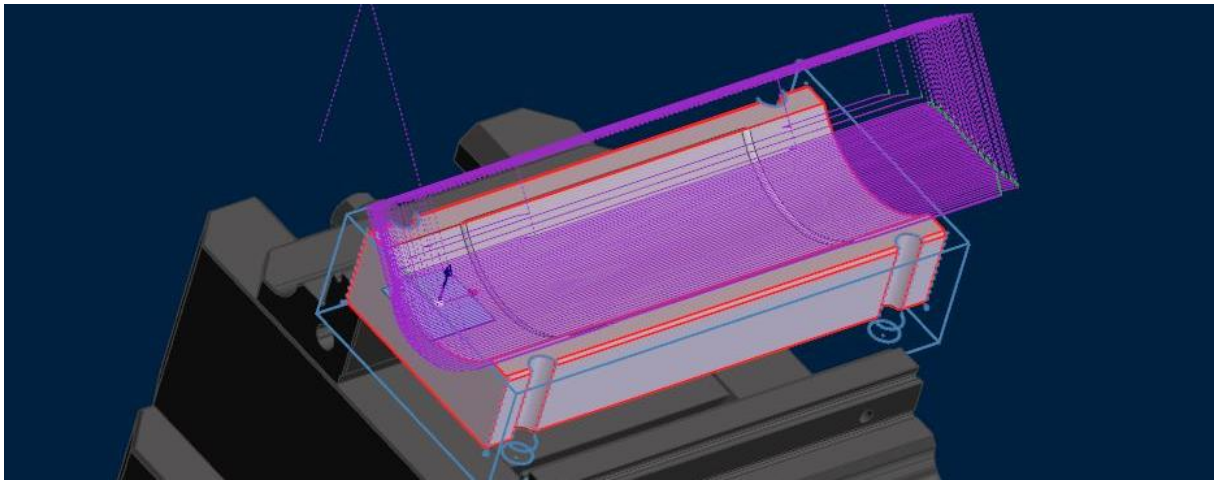
Hrubovací úsek operace frézování bude proveden nasazením tří srovnávaných technologií obrábění. Jak bylo zmíněno, tato fáze výrobního procesu bude odlišná v závislosti na použité technologii frézování. Výrobní program pro frézování byl vytvořen pomocí softwaru EDGECAM. Pomocí následujících snímků budou popsány strategie vedení nástroje pro každý ze srovnávaných způsobů výroby. Konkrétní použité nástroje a nasazené řezné podmínky budou popsány v kapitole 5, zabývající se již konkrétní výrobou součástí.

První nasazená bude konvenční metoda výroby s využitím rohového frézování. Samotná strategie hrubování bude složena ze dvou částí. První bude hrubování obvodových rozměrů vyráběné součásti, tzn. rozměrů 147 x 62 mm, do hloubky 28 mm strategií vedení nástroje po kontuře, kterou bude tvořit vnější obvod vyráběné součásti, viz. Obrázek 21. Přídavek na stěnu bude nastaven na hodnotu 0,4 mm.



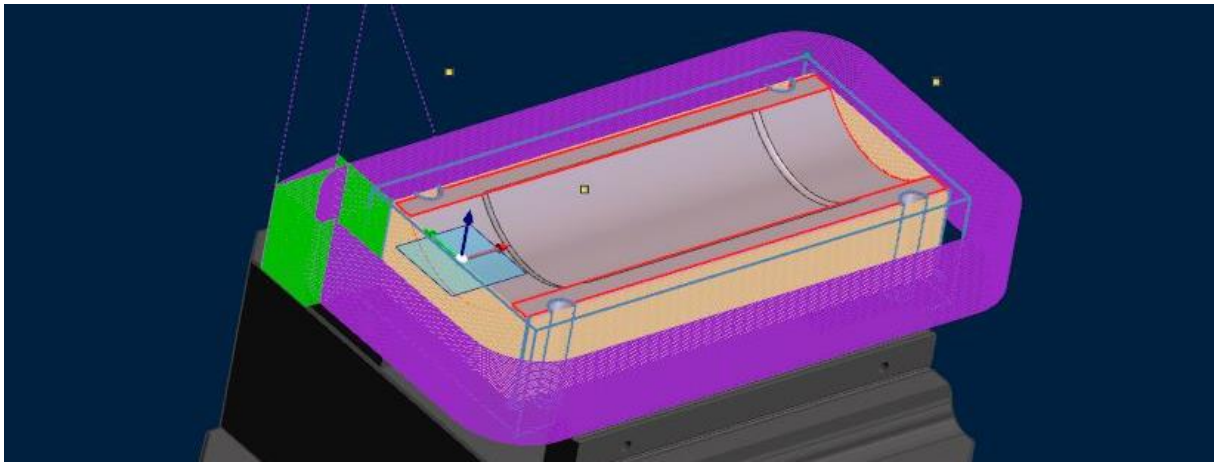
Obrázek 21: Stružný nůž - konvenční metoda, strategie pro vnější obvod

Druhou částí bude hrubování tvarové části R 30 ±0,02 mm včetně odlehčení R 30,5 mm v délce 97 mm. Frézování bude probíhat při naklopení otočného stolu v ose A o hodnotu -45°. Samotné obrábění bude provedeno bokem nástroje strategií řádkování, viz. Obrázek 22. Oblasti s přebytečným množstvím zbytkového materiálu po prvním hrubování budou dále zbytkově hrubovány.

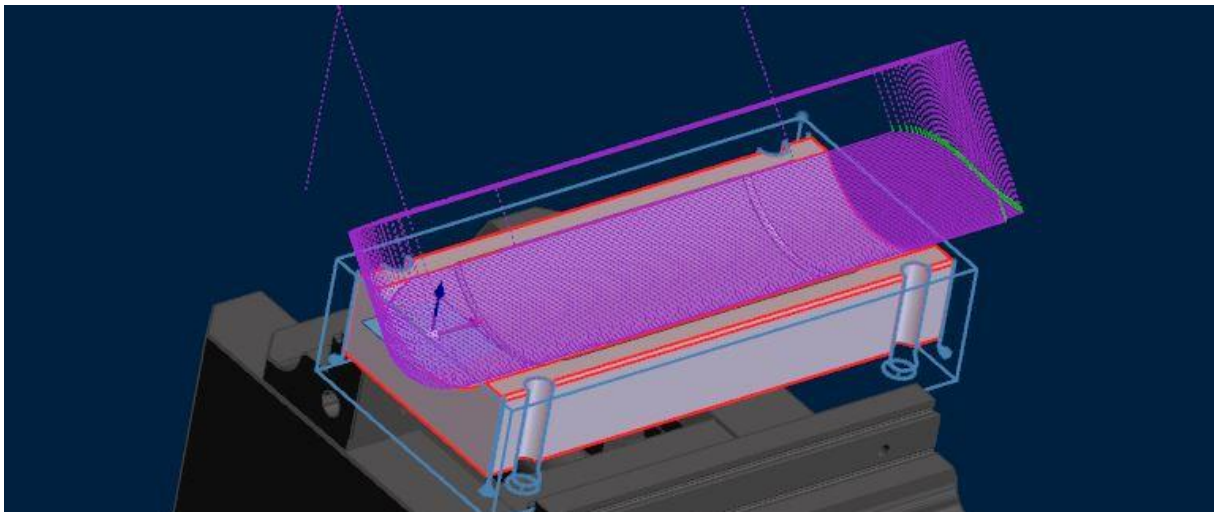


Obrázek 22: Stružný nůž - konvenční metoda, strategie pro tvarovou část

Druhým nasazeným způsobem frézování v rámci hrubovacího úseku bude vysokoposuvové frézování. Strategie vedení nástroje bude pro obrábění vnějšího obvodu a tvarové části totožná jako v případě předchozí konvenční metody, viz. Obrázek 23, Obrázek 24. Viditelný je, oproti konvenční metodě, rozdíl v počtu vygenerovaných drah, zejména po obvodu obrobku. Důvodem je nastavení výrazně nižší axiální hloubky řezu, což je charakteristickým znakem vysokoposuvového frézování, který vyplývá z konstrukce frézy.

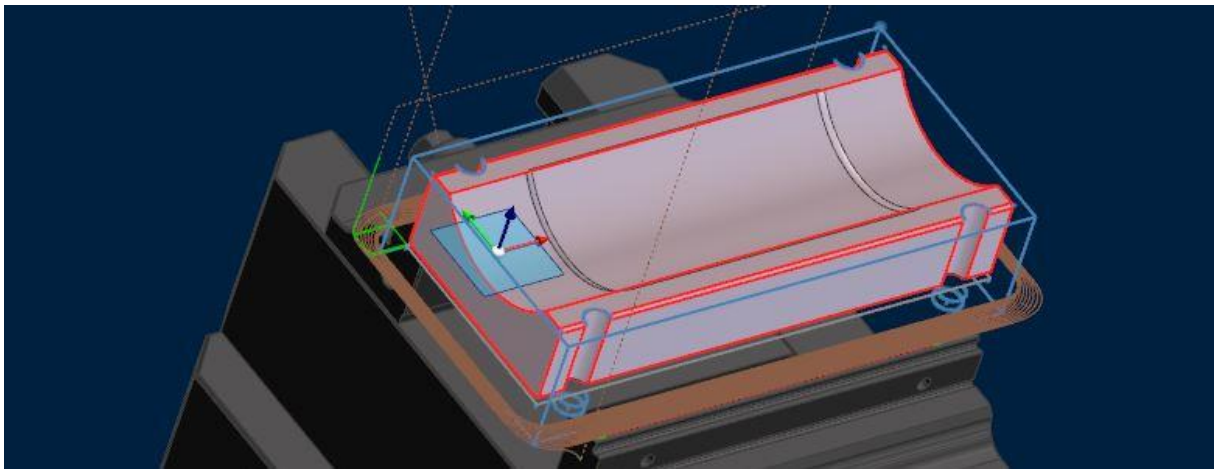


Obrázek 23: Střižný nůž - vysokoposuvové frézování, strategie pro vnější obvod

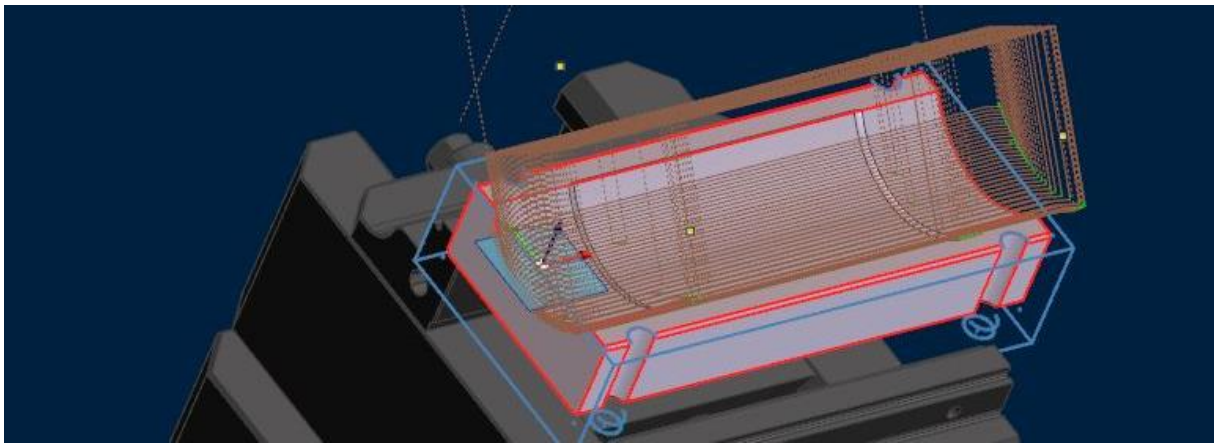


Obrázek 24: Střižný nůž - vysokoposuvové frézování, strategie pro tvarovou část

Poslední bude nasazena metoda s využitím trochoidního frézování. Z důvodu tvarového charakteru vyráběné součásti nebude možné využít tuto technologii v plném rozsahu, tedy vedením nástroje po cykloidách. Po obvodu obrobku bude nicméně možné využít délky řezné části nástroje a frézovat tak s nastavením maximální požadované axiální hloubky řezu 28 mm. Nástroj, narozdíl od předchozích dvou případů, bude muset být veden postupně směrem „dovnitř“ obrobku s nastavením nízké hodnoty bočního kroku, což je viditelné na množství vygenerovaných drah ve směru radiální hloubky řezu, viz. Obrázek 25. Strategie pro obrábění tvarové části zůstává opět stejná jako v předchozích případech, z důvodu již zmíněného tvaru vyráběné součásti, v důsledku čehož není možné efektivně odebírat materiál trochoidním pohybem. Frézování tedy proběhne opět bokem nástroje při naklopení otočného stolu pod úhlem -45°, viz. Obrázek 26.



Obrázek 25: Střižný nůž - trochoidní frézování, strategie pro vnější obvod



Obrázek 26: Střižný nůž - trochoidní frézování, strategie pro tvarovou část

4.2 Svrchní matrice

Výrobní proces začne na pracovišti pili, kde bude polotovar nařezán na požadovanou délku. Výsledný rozměr polotovaru bude 95 x 95 x 50 mm. Následovat bude proces frézování na obráběcím centru ALZMETALL GS800/5, kde bude obrobena podstatná část tvaru vyráběné součásti.

Polotovar bude upnut za rozměr 95 mm. Operace frézování začne zarovnáním čela obrobku. Následovat bude hrubování obrobku, při kterém budou opět v závislosti na nasazené výrobní technologii použity odlišné výrobní nástroje. Samotná strategie hrubování zůstane u všech tří výrobních technologií do značné míry shodná.

Nejprve proběhne hrubování obvodu vyráběné součásti 79 x 81,5 mm a hrubování nakloněné roviny 5° ±0,1°. Pokračovat bude výroba osazení 5,5 mm k míře 59,5 -0,02 mm. Po obvodu čela obrobku bude vyrobeno požadované sražení dle výkresu. Po obvodu vyráběné součásti bude dokončen rozměr šířky 79 mm a rozměr délky 81,5 mm s přídavkem 3 mm pro konečné erodování tvarové části R 30 ±0,02 mm. Na konečný rozměr bude dokončeno i osazení 5,5 mm k míře 59,5 -0,02 mm.

Pokračovat bude tvorba otvorů. Nejprve bude vyvrtán startovací otvor pro díru Ø 11 H7. Následně bude pro tuto díru vytvořeno kuželové zahloubení. Poté se přejde k výrobě „levého bočního“ otvoru k míře 49 mm s trubkovým závitem G ¼″ a válcovým zahloubením Ø 20 mm. Nejprve bude vyvrtán otvor pod závit G ¼″, následovat bude výroba díry Ø 10 mm do hloubky 63 mm hotově. Frézováním strategií bokem nástroje bude dokončeno válcové zahloubení Ø 20

mm. Po obvodu otvoru Ø 20 mm bude zhotoveno sražení. Frézováním bude finálně připraven otvor pod závit G ¼″, který bude následně vyroben příslušným závitníkem. Obdobným způsobem budou zhotoveny i dva zbývající otvory se závity G ¼″, zde pouze nebude potřeba vyrábět válcová zahloubení.

Následně bude obrobek otočením o 180° přeupnut za obrobený rozměr 79 mm. Pokračovat bude výroba nakloněné roviny pod úhlem 30° s přechodovým rádiusem R 20 mm. Nejprve bude potřeba odstranit přídavek po předchozím prvním upnutí, kdy bude zároveň zarovnána současná čelní plocha obrobku tak, aby byl zachován rozměr výšky 40 -0,05 / -0,1 mm s přídavkem 0,3 mm pro broušení. Navazovat bude operace hrubování nakloněné roviny. Zde, obdobně jako u předchozího upnutí, budou v závislosti na nasazené výrobní technologii použity odlišné výrobní nástroje. Samotná strategie hrubování bude u všech tří výrobních technologií do značné míry shodná. Vyhrubovaná plocha bude následně dokončena na požadovaný rozměr frézováním bokem nástroje. Poslední operací bude vytvoření zaoblení R 20 mm v místě tangenciálního přechodu mezi nakloněnou rovinou a současnou svrchní plochou obrobku pomocí kulové frézy.

Po frézování bude následovat odjehlení obrobku pro odstranění otřepů použitím pneumatické brusky a příslušné technické frézy s ohledem na střižné hrany. Obrobek bude dále na nefunkční ploše dle výrobního výkresu označen popisovacím zařízením. Součást bude následně kalena na požadovanou hodnotu 56+2 HRc uvedenou v razítku výrobního výkresu. Zakalená součást bude poté broušena na konečný tolerovaný rozměr výšky 40 -0,05 / -0,1 mm s ohledem na geometrickou toleranci kolmosti.

Konečné zhotovení tvarové části R 30 ±0,02 mm a průchozí díry Ø 11 H7 se střižnými hranami bude provedeno elektroerozivním drátovým řezáním. Po této operaci bude následovat odjehlení již s ohledem na řezné hrany. Na závěr bude dle výrobního výkresu leštěna plocha s předepsanou hodnotou drsnosti Rz 1 μm. Hotový nástroj bude poté na příslušné ploše dle výrobního výkresu deponován tenkou vrstvou.

4.3 Spodní matrice

Spodní a svrchní matrice jsou z velké části podobné nástroje. Množství prvků je u obou nástrojů totožných, některé z nich jsou pouze zrcadlově otočené. Hlavním rozdílem obou nástrojů je tvarové zaoblení zahrnující střižnou hranu. U spodní matrice je toto zaoblení zkonstruováno s nepatrně odlišným poloměrem R = 29,5 ± 0,02 mm, které je k míře 22 mm odsazeno o 1 mm (viditelné v řezu A-A). Pro podobnost obou nástrojů bude i jejich výrobní postup téměř shodný. V následujícím návrhu technologie výroby budou podrobněji popsány pouze odlišné výrobní operace.

Výrobní proces začne obdobně na pile nařezáním polotovaru na požadovaný rozměr pro obrábění 95 x 95 x 50 mm. Následovat bude frézování na obráběcím centru ALZMETALL GS800/5, kde bude nejprve zarovnáno čelo obrobku. Poté se přejde ke hrubování tvaru vyráběné součásti. Kromě hlavních rozměrů se bude hrubovat i tvar R 29,5 ± 0,02 mm s přechodovým rádiusem R 6 mm včetně odsazení a také boční nakloněná rovina 5° ± 0,1°. Zde se budou opět v závislosti na nasazené výrobní technologii měnit používané výrobní nástroje. Následovat bude frézování osazení 5,5 mm k míře 58,5 -0,02 / -0,04 mm. Hrubovací frézou se provede zbytkové hrubování přechodového rádiusu R 6 mm, který je součástí tvarové části R 29,5 ±0,02 mm odsazené o 1 mm. Po hrubování bude vytvořeno sražení po obvodu čela obrobku.

Následovat budou dokončovací operace. Nejprve budou dokončeny obvodové plochy na konečné rozměry výrobku s výjimkou tvarové plochy s R 29,5 ±0,02 mm. Dokončena bude i tvarová plocha odsazená o 1 mm k míře 22 mm a osazení 5,5 mm k míře 58,5 -0,02 / -0,04 mm.

Pokračovat bude výroba otvorů. Zde bude oproti svrchní matrici změna ve výrobě odlišného průchozího otvoru Ø 11,9 H7 / Ø 14 mm. Při prvním upnutí bude hotově vyvrtána díra průměru 14 mm do hloubky 32 mm. Následně bude na Ø 14 mm vyrobeno kuželové zahloubení. Pokračovat bude výroba zbývajících otvorů dle výrobního výkresu, které budou zhotoveny obdobným způsobem, jako v případě svrchní matrice.

Následovat bude přeupnutí obroku za obrobený rozměr 79 mm a výroba zbývajících tvarů výsledné součásti. Nejprve proběhne zarovnání současné čelní plochy obrobku, poté výroba nakloněné roviny 30° obdobně jako v případě svrchní matrice. Navazovat bude zbytkové hrubování přechodového rádiusu R 6 mm, které je součástí tvarové části R 29,5 ±0,02 mm. Následně bude celá tato tvarová část dokončena s přídavkem 0,3 mm. Poté bude kulovou frézou zhotoveno přechodové zaoblení R 20 mm. Poslední operací bude vrtání otvoru pro následnou výrobu Ø 11,9 H7.

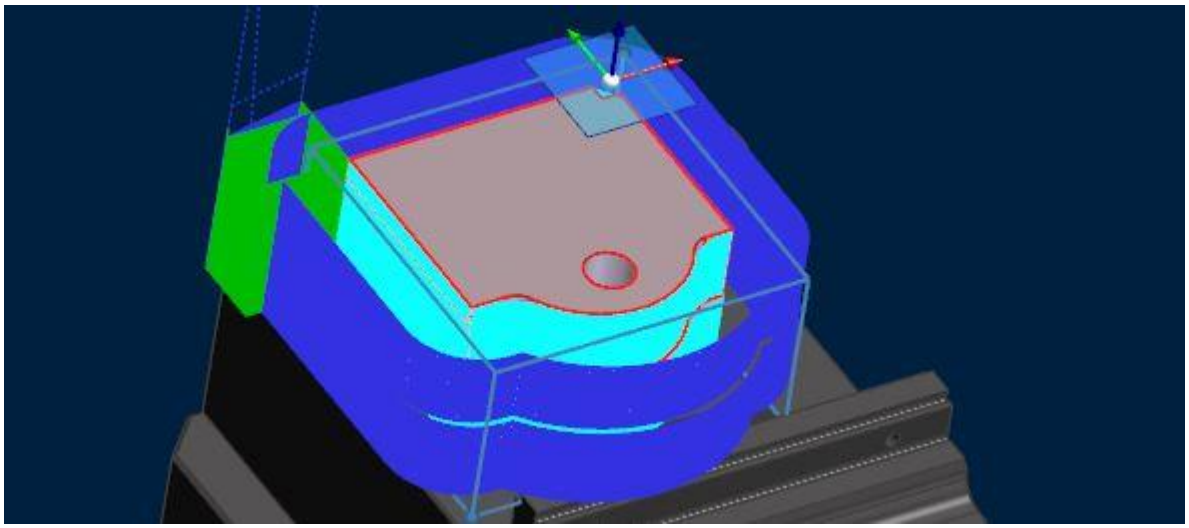
Po frézování vyráběné součásti bude následovat odjehlení s ohledem na střižné hrany, označení dle výrobního výkresu a kalení. Zakalená součást bude poté jednostranně broušena na konečný požadovaný rozměr 40 -0,05 / -0,1 mm s ohledem na geometrickou toleranci kolmosti.

Konečná výroba tvarové části R 29,5 ±0,02 mm a Ø11,9 H7 se střižnými hranami bude provedena opět ve frézovacím centru. Nejprve bude na tvarové části R 29,5 ±0,02 mm odstraněn přídavek po předchozím frézování a kalení, následně bude tvar obroben na finální tolerovaný rozměr. Obdobným způsobem bude vyrobena díra průměru 11,9 mm s tolerancí H7. Nejprve bude odebrán přídavek po předvrtaném otvoru a kalení, následně bude otvor opět dokončen na tolerovaný rozměr.

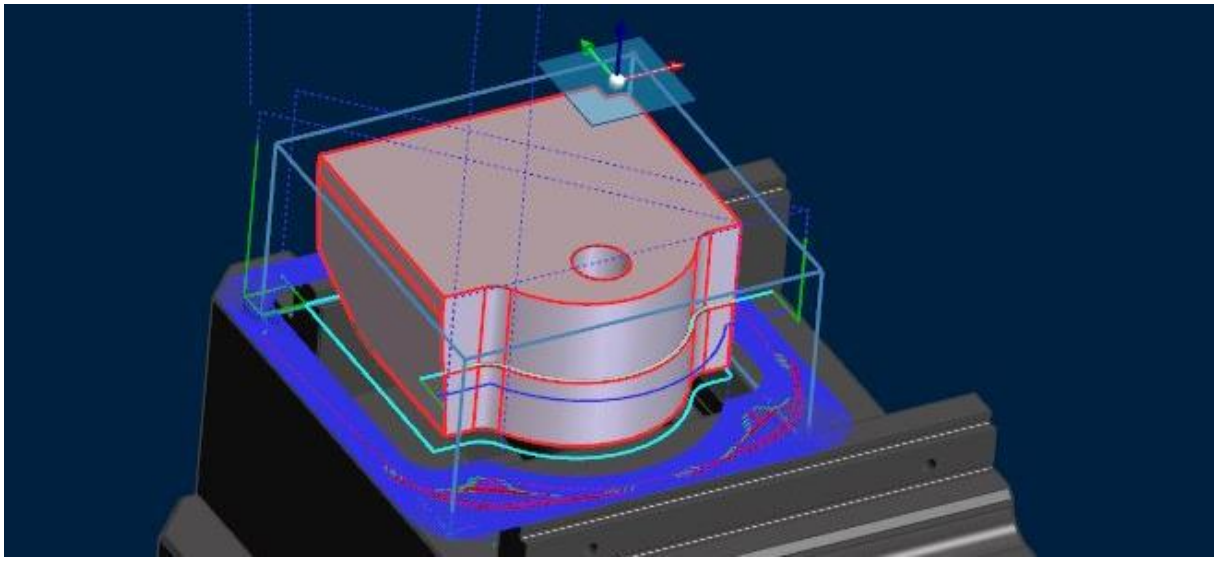
Po frézování bude opět následovat odjehlení s ohledem na střižné hrany dle výrobního výkresu. Na závěr bude dle výrobního výkresu leštěna plocha s předepsanou hodnotou drsnosti Rz 1 μm. Hotový nástroj bude poté dle výrobního výkresu deponován tenkou vrstvou.

4.3.1 Hrubovací strategie

Nástroje spodní a svrchní matrice jsou si tvarově velice podobné. Proto i postup výroby je do značné míry shodný. Strategie vedení nástroje při hrubování vnějších obvodových rozměrů obou nástrojů je opět stejná. Jedná se o vedení nástroje po kontuře. Odlišná je pouze zvolená geometrie kontury, kdy u spodní matrice jsou zvolenou konturou vnější obvod vyráběné součásti včetně tvarového zaoblení R 29,5 ±0,02 mm s přechodovým rádiusem R 6 mm. V případě svrchní matrice bude tvarová část R 30 ±0,02 mm vyrobena elektroerozivním drátovým řezáním. Jako geometrie kontury budou proto zvoleny pouze hlavní rozměry 79 x 81,5 mm bez tvarového zaoblení. Pro podobnost je strategie vedení nástroje znázorněna na příkladu spodní matrice při nasazení vysokoposuvového frézování, viz. Obrázek 27, a trochoidního frézování, viz. Obrázek 28. Opět je viditelná změna v axiální hloubce řezu, kdy nasazením trochoidního frézování je možné znovu využít délku řezné části nástroje a obrábět tak v celé potřebné hloubce najednou. Rozdílem při nasazení trochoidního frézování jsou dráhy vygenerované ve směru radiální hloubky řezu. Frézování konvenční metodou již není znázorněno. Charakter vygenerovaných drah pro vedení nástroje je shodný jako u vysokoposuvového frézování. Rozdíl je pouze v jejich množství. Vzhledem k nastavení vyšší axiální hloubky řezu je jejich počet menší, jsou tedy méně „nahuštěné“.



Obrázek 27: Spodní matrice - vysokoposuvové frézování, strategie pro vnější obvod



Obrázek 28: Spodní matrice - trochoidní frézování, strategie pro vnější obvod

4.4 Výrobní zařízení

4.4.1 Alzmetall GS800/5

Jedná se o 5osé obráběcí centrum s možností aplikace frézování, soustružení, vrtání a broušení při jednom upnutí. Výrobce slibuje extrémně tuhou konstrukci zařízení, patřičnou dynamiku a tepelnou stálost rozměrů bez další potřeby jejich kompenzace. Pohyb vřetena je zajištěn pomocí lineárního vedení, kuličkového šroubu a servopohonu ve směrech os X, Y, Z, slibující vysokou přesnost a konzistenci při opisování kontur. Rotace otočného stolu v ose C a naklápění kolébky stolu v ose A jsou zajištěny přímým pohonem, který zajišťují prstencové (momentové) elektromotory. Ty poskytují vysoké rychlosti naklápění a rotace, vysokou přesnost pohybů díky bezvůlovému spojení a eliminaci tření komponent pohonu. Pro obráběcí centrum je možný výběr z variant otočných stolů. Výrobní zařízení je dále vybaveno řídicím systémem Heidenhain iTNC 530 HSCI, zásobníkem nástrojů se 75 pozicemi, dotykovou sondou s infračerveným přenosem signálu, laserovým měřicím systémem pro bezdotykové měření a monitorování nástrojů, dopravníkem třísek a jednotkou pro odvod a filtraci procesní kapaliny. [26]

Tabulka 3: Alzmetall GS800/5 Technické parametry [26]

Výrobní zařízení	
Rozměry bez doplňků *šířka/délka/výška*	2 345 / 4 250 / 2 600 mm
Hmotnost bez doplňků	13 000 kg
Pracovní prostor	650 / 650 / 550 mm
Otočný stůl	
Vzdálenost vřeteno – stůl *min/max*	100 / 650 mm
Osa A - rozsah úhlu naklonění	± 140°
Osa C – rotace	360°
Průměr	Ø 600
Nosnost	500 kg
Pohon - směr posuvu	
Rychlost max. - osa X, Y, Z	60 m/min
Pohon – vřeteno	
Výkon max.	26 kW
Otáčky max.	18 000 min^{-1}
Točivý moment max.	116 Nm
Zásobník nástrojů	
Počet pozic	33 [63] [75]
Výměna nástroje chip-to-chip	6 s
Rozměr nástroje max. *průměr/délka*	150 / 225 mm
Hmotnost nástroje max.	10 kg

Obrázek 29: Alzmetall GS 800/5 [26]

4.4.2 Blohm REDLINE S

CNC rovinná bruska umožňující rovinné, profilové a tvarové broušení se souvislým CNC řízením v osách X, Y, Z pomocí kuličkových šroubů a servopohonů. Pohon brusného vřetena umožňuje konstantní i proměnné rychlosti otáčení. Zařízení je vybaveno upínacím magnetickým stolem s elektro-permanentním magnetem, systémem pro orovnání brusného kotouče pomocí diamantového orovnávače se stopkou a jednotkou pro filtraci chladící kapaliny. Bruska je dále vybavena řídícím systém SINUMERIK 840 s uživatelsky přístupným hardwarem s dotykovou obrazovkou a přenosným pomocným ovládacím panelem s integrovaným ručním kolečkem. Řídící systém nabízí množství automatických cyklů pro broušení obrobku a orovnání brusného kotouče. [27]

Obrázek 30: Blohm REDLINE S [27]

Tabulka 4: REDLINE S Technické parametry [27]

Výrobní zařízení	
Rozměr *šířka / délka / výška*	3 200 / 3 100 / 2 140 mm
Pracovní prostor *šířka x délka*	400 x 800 mm
Magnetický stůl	
Upínací plocha včetně pomocné plochy	400 x 1 200 mm
Vzdálenost stůl – střed vřetena *min/max*	125 / 575 mm
Nosnost s magnetickým sklíčidlem	700 kg
Pohon – směr posuvu	
Osa X – podélný pojezd Rychlost posuvu	900 mm 30 – 30 000 mm/min
Osa Y – vertikální pojezd Rychlost posuvu	450 mm 4 – 4 000 mm/min
Osa Z – příčný pojezd Rychlost posuvu	360 mm 4 – 4 000 mm/min
Pohon - vřeteno	
Výkon	4,5 kW při 1 500 ot/min
Rozměr brusného kotouče *průměr x šířka x upínací průměr*	300 x 50 x 76,2

4.4.3 AgieCharmilles AC Progress VP3

Popisovaným zařízením je elektroerozivní drátová řezačka. Pomocí drátu minimálního průměru až 0,05 mm je možné zhotovit drobné a přesné tvary s vysokou kvalitou povrchu, která standardně dosahuje Ra 0,2 μm. K dosažení vysoké jakosti povrchu dopomáhá možnost souběžného využití dvou drátů při výrobě jednoho obrysu. Vysoké přesnosti polohování dosahuje zařízení kombinací vysoké tuhosti konstrukce, systému měřicích zařízení a řídící jednotky. Měřicí systém se skládá ze dvou nezávislých měřicích zařízení, kodérů, které zajišťují přesné polohování v ose. Pracovní prostor stroje poskytuje různé možnosti upnutí i značně rozměrných obrobků. Teplo vytvořené v průběhu pracovního cyklu zařízení je rozptýleno pomocí chladící kapaliny a je dále regulováno tepelnými výměníky. Drátová řezačka je vybavena řídícím systémem AGIEVISION 5 s potřebným softwarem pro vedení výrobního cyklu, tvorbu a optimalizaci výrobního programu, navíjení drátu, kontrolu stavu dielektrika a dalších funkcí. Veškeré potřebné řídící funkce jsou seskupeny v přenosné řídící jednotce s integrovaným ručním kolečkem a LCD displejem. [28]

Tabulka 5: AC Progress VP3 Technické parametry [28]

Výrobní zařízení	
Rozměr *délka / šířka / výška*	1 940 / 2 300 / 2 600 mm
Hmotnost	3 460 kg
Pracovní prostor	
Max. rozměr obrobku *délka / šířka / výška*	1 050 / 650 / 420 mm
Max. hmotnost obrobku	400 kg
Pohon	
Osa X / Y / Z – rozsah	500 / 350 / 426 mm
Osa X / Y – max. rychlost	3 m/min
Osa U / V – rozsah	±70 mm
Max. kuželovitost	<30° / 100 mm
Generátor	
Vysoce výkonný generátor IPG-VPC	60 A
Max. úběr s drátem Ø 0,33 mm	>500 mm^2/min

Obrázek 31: AgieCharmilles AC Progress VP3 [28]

4.4.4 Carl Zeiss ScanMax

Jedná se měřicí stanici určenou k dílenskému použití. Zařízením je možné provádět bodové měření, snímání celých ploch, posouzení správnosti výroby s okamžitými výsledky. Měřicí stanice dosahuje garantované přesnosti měření při teplotách výrobního prostředí. Zařízení je zkonstruováno tak, aby působení okolního prostředí neovlivňovalo přesnost měření. Toho je dosaženo základem z polymerbetonu, který zajišťuje vlastní stabilitu stanice a odolnost proti vibracím, a dále pomocí patentovaných korekčních technik. Veškeré měřicí systémy stanice jsou zcela uzavřeny od okolního výrobního prostředí, díky čemuž je zařízení odolné vůči kapalinám, prachu a dalším nečistotám okolí. Měřicí stanice je pro ruční snímání vybavena lehkým kloubovým ramenem z uhlíkového vlákna. Tento materiál zajišťuje vysokou tuhost a tepelnou stabilitu nástroje. V průběhu ručního snímání stanice soustavně monitoruje sílu působící na měřicí sondu a kompenzuje její ohyb, čímž zcela eliminuje dynamické vlivy v průběhu měření. Přesných výsledků měření zařízení dále dosahuje sběrem řady úzce sousedících bodů v průběhu jednoho nepřetržitého měření sondou, čímž je možné s vysokou přesností popsat tvar zkoumaného povrchu. Samotné měření probíhá jednoduše opisováním kontury sondou. Výsledky měření jsou zobrazeny na obrazovce v podobě trojrozměrného grafu. Ovládání měřicího procesu je umožněno pomocí uživatelského rozhraní v podobě hardwarové jednotky vybavené softwarem ScanWare. [29]

Obrázek 32: Carl Zeiss ScanMax [29]

5 Výroba zvoleného řezného nástroje

V následující kapitole bude představena výroba vybraných výrobních nástrojů. Na příkladu výroby střižného nože a spodní matrice bude představeno nasazení srovnávaných technologií výroby. Jelikož byly srovnávané výrobní technologie u všech vyráběných nástrojů nasazeny při procesu hrubování, bude popis výroby zaměřen konkrétně na hrubovací operace. Z hlediska následného testování životnosti vybraných výrobních nástrojů, kdy bude kladen důraz především na střižné hrany matric, bude zároveň popsána i výroba spodní a svrchní matrice se zaměřením na dokončovací operace.

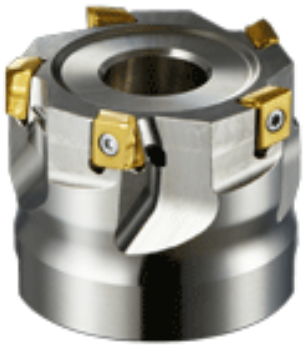
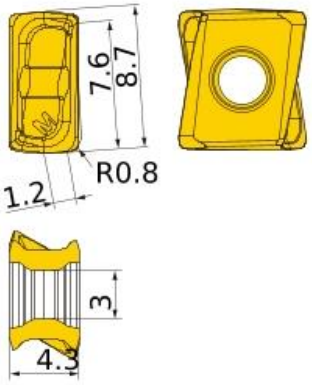
5.1 Výroba střižného nože

Srovnávané výrobní technologie byly nasazeny při hrubování hlavních rozměrů délky a šířky 147 x 62 mm a tvarového vybrání R 30 ±0,02 mm včetně odlehčení R 30,5 mm v délce 97 mm. Nasazené strategie frézování byly ve všech třech případech srovnávaných výrobních technologií obdobné. Obvod vyráběné součásti, 147 x 62 mm, byl frézován opisováním vnější kontury obrobku. Hrubování tvarového vybrání bylo provedeno při naklopení otočného stolu v ose A o úhel -45° strategií řádkování.

5.1.1 Konvenční metoda s využitím rohového frézování

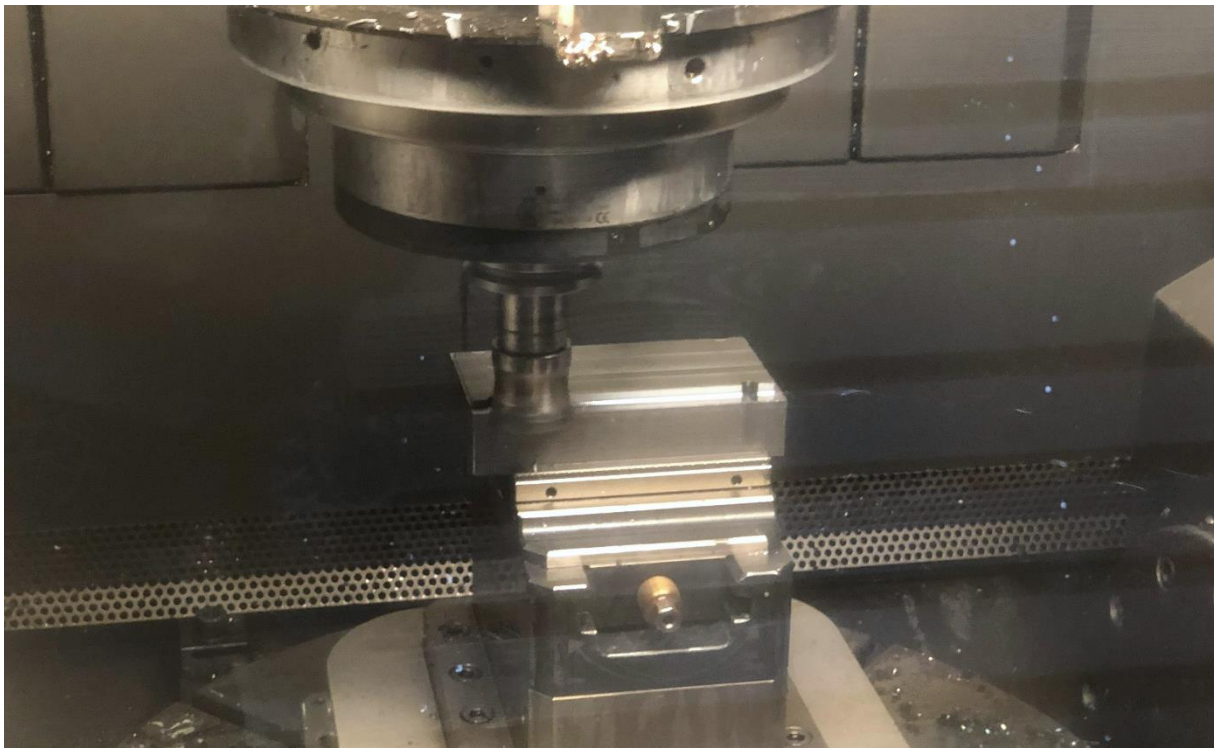
U konvenční metody byla k hrubování použita rohová fréza Mitsubishi Materials VPX200-040A06AR s řezným průměrem 40 mm. Parametry VBD, doporučené řezné podmínky a použité řezné podmínky jsou uvedeny níže, viz. Tabulka 6, Tabulka 7. Obrázek 33, Obrázek 34 z průběhu výroby součástí ukazují nasazení zvolených strategií frézování.

Tabulka 6: Parametry nástroje - konvenční metoda [30]

Tělo **MITSUBISHI MATERIALS** **VPX200-040A06AR**	**VBD destička** **MITSUBISHI MATERIALS** **LOGU0904080PNER-M**	**Doporučené řezné podmínky**	
		v_c [m/min]	80 - 120
		a_p [mm]	≤ 8
		f_z [mm/zub]	0,1 – 0,2

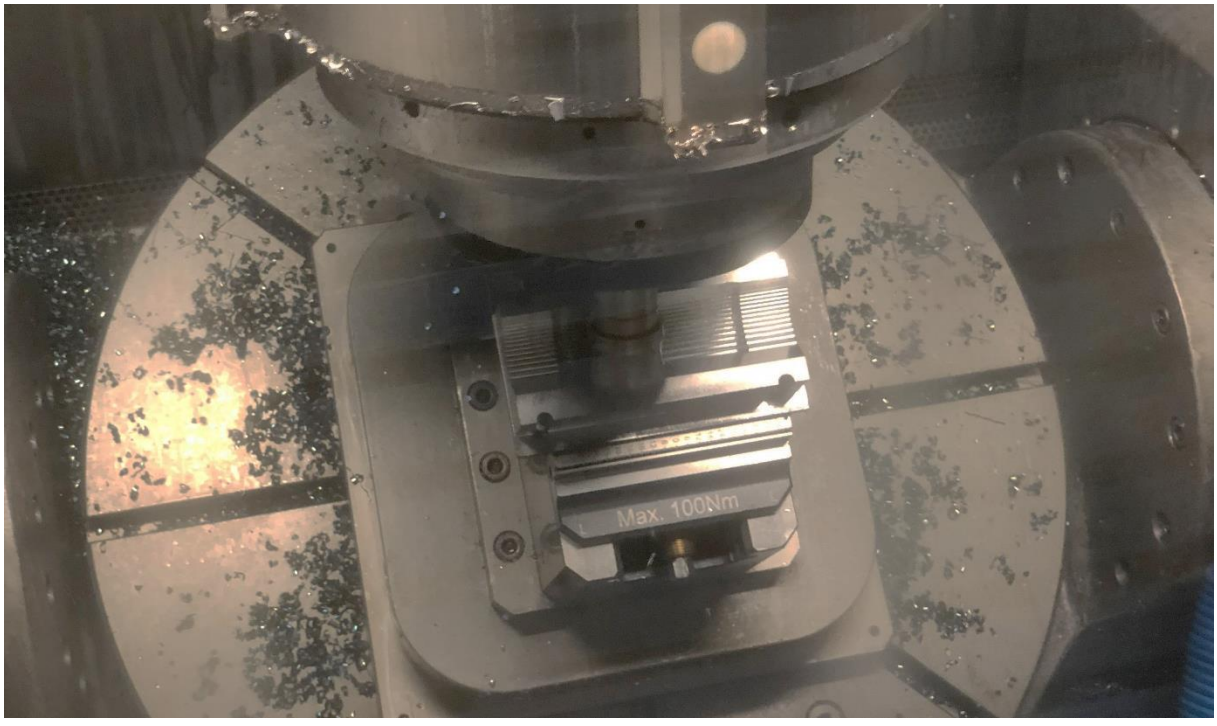
Tabulka 7: Použité řezné podmínky - konvenční metoda

a_p [mm]	a_e [mm]	f [mm/min]	n [ot/min]
2,4	6,5	1 300	1 300

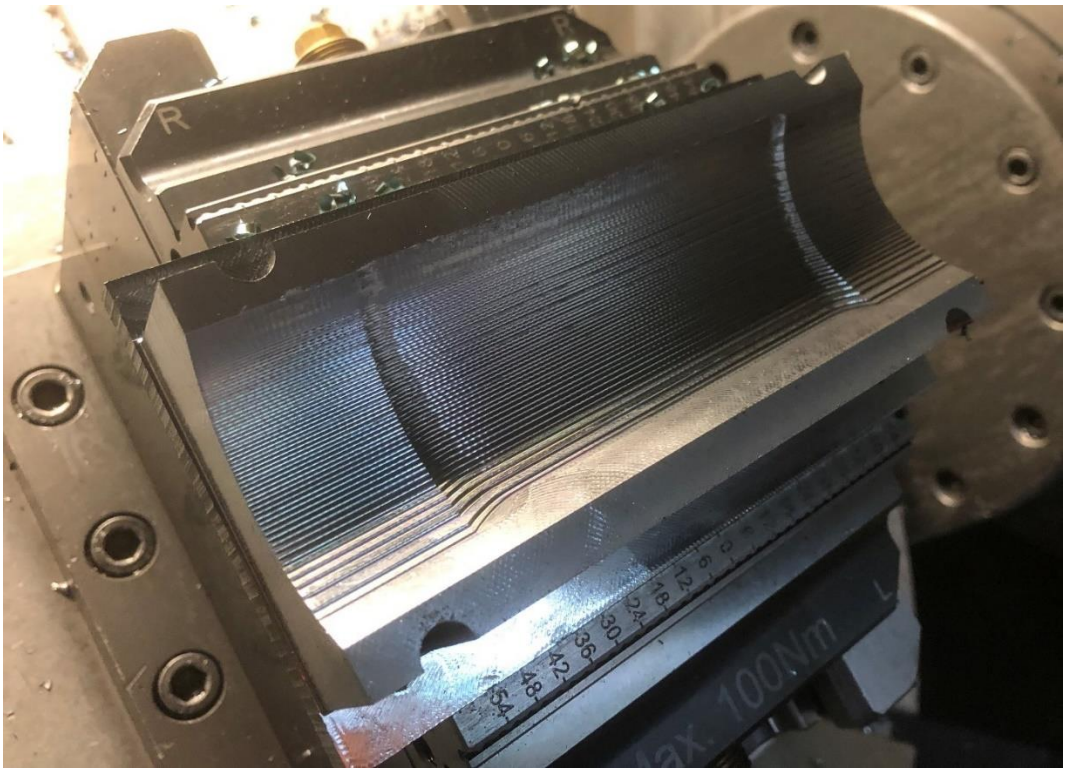


Obrázek 33: Konvenční metoda - hrubování hlavních rozměrů

Při hrubování tvarového vybrání byla nastavena hodnota a_p = 2 mm, radiální hloubka řezu byla v závislosti na obráběném tvaru proměnná. Oblasti s přebytečným množstvím zbytkového materiálu po prvním hrubování byly dále zbytkově hrubovány s nastavením bočního kroku 0,5 mm při 120% hodnoty posuvu. Výsledný tvar obrobku po hrubování pomocí rohové frézy ukazuje Obrázek 35.



Obrázek 34: Konvenční metoda - hrubování tvarového vybrání

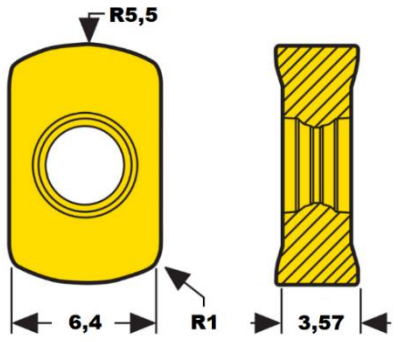


Obrázek 35: Konvenční metoda - stav obrobku po hrubování

5.1.2 Vysokoposuvové frézování

Hrubovací strategie metodou vysokoposuvového frézování byla totožná jako v případě konvenční metody. Jako nástroj byla použita vysokoposuvová fréza SECO R217.21-1640.RE-LO06.5A s řezným průměrem 40 mm. Parametry VBD, doporučené řezné podmínky a použité řezné podmínky uvádí Tabulka 8, Tabulka 9. Pro totožnost strategií frézování je níže zobrazen až konečný tvar obrobku po hrubování, viz. Obrázek 36.

Tabulka 8: Parametry nástroje - vysokoposuvové frézování [31]

Tělo **SECO** **R217.21 -1640.RE-LO06.5A**	**VBD destička** **SECO** **LOHT 060310TR-M07.MP2500**	**Doporučené řezné podmínky**	
		v_c [m/min]	320 - 435
		a_p [mm]	≤ 2,5
		f_z [mm/zub]	0,41 – 0,46

Tabulka 9: Použité řezné podmínky - vysokoposuvové frézování

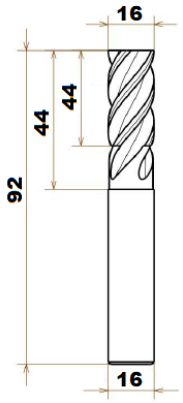
a_p [mm]	a_e [mm]	f [mm/min]	n [ot/min]
0,6	6,5	5 000	1 430

Obrázek 36: Vysokoposuvové frézování - stav obrobku po hrubování

5.1.3 Trochoidní frézování

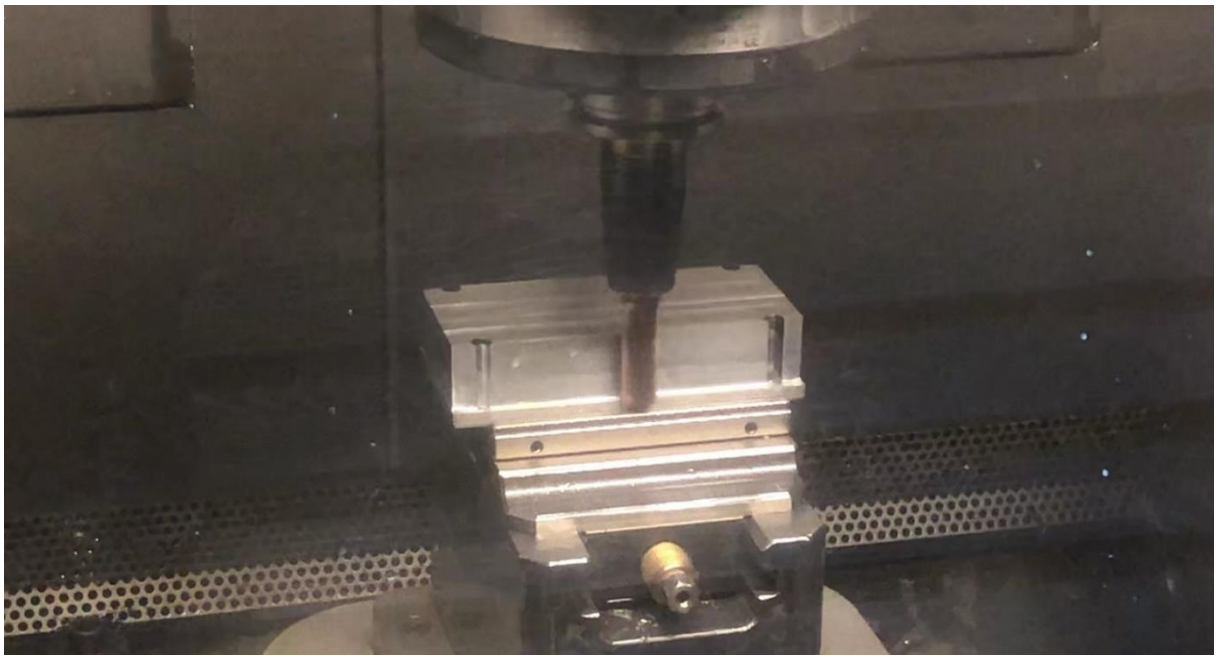
Poslední nasazenou technologií byla technologie trochoidního frézování. Použitým nástrojem byla stopková trochoidní fréza JSV JSWF-16-44-44-92-16-6-41 s řezným průměr 16 mm. Na rozdíl od předešlých dvou metod obrábění bylo v tomto případě, díky konstrukci nástroje, při hrubování hlavních obvodových rozměrů možné využít větší řezné délky nástroje. Parametr axiální hloubky řezu bylo díky tomu možné nastavit na maximální požadovanou hloubku obrábění, viz. Obrázek 37. Strategie hrubování tvarového vybrání byla opět obdobná jako v předchozích případech. Konečný tvar obrobku po hrubování metodou trochoidního frézování znázorňuje Obrázek 38. Bližší parametry nástroje a použité řezné podmínky udává Tabulka 10, Tabulka 11.

Tabulka 10: Parametry nástroje - trochoidní frézování [32]

Tělo **JSV** **JSWF-16-44-44-92-16-6-41**	**Doporučené řezné podmínky**	
	**v_c** [m/min]	140 - 160
	a_p [mm]	≤ 44
	f_z [mm/zub]	0,28 – 0,36

Tabulka 11: Použité řezné podmínky - trochoidní frézování

a_p [mm]	a_e [mm]	f [mm/min]	n [ot/min]
28	0,5	5 000	3 182



Obrázek 37: Trochoidní frézování - hrubování hlavních rozměrů

Obrázek 38: Trochoidní frézování - stav obrobku po hrubování

5.2 Výroba spodní matrice

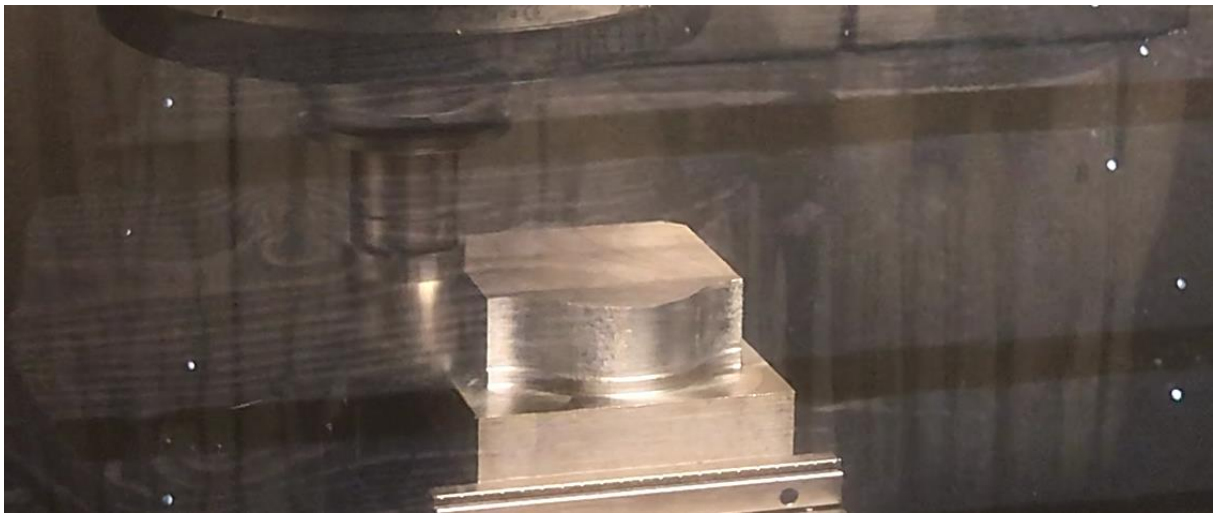
Srovnávané výrobní technologie byly nasazeny při hrubování obvodových rozměrů nástroje včetně tvarového zaoblení R 29,5 ±0,02 mm s přechodovým rádiusem R 6 mm. Nasazené strategie frézování byly ve všech třech případech srovnávaných výrobních technologií obdobné. Výrobní nástroj byl veden po kontuře. Použité výrobní nástroje byly pro hrubování všech tří součástí stejné, a proto nebudou znovu uváděny jejich parametry.

5.2.1 Konvenční metoda s využitím rohového frézování

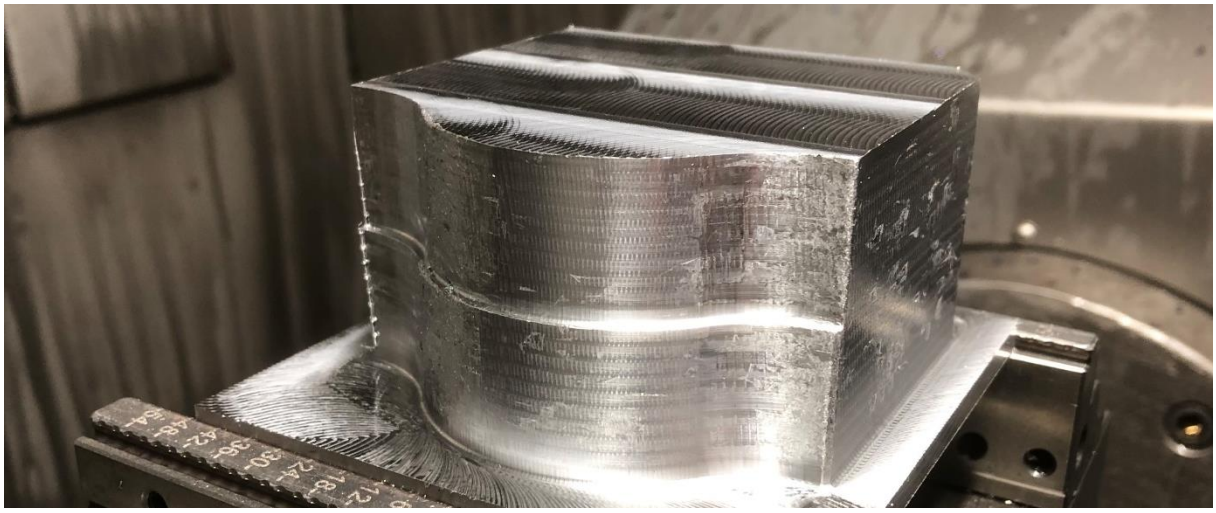
Součást byla hrubována opět pomocí rohové frézy Mitsubishi Materials VPX200-040A06AR s řezným průměrem 40 mm zmíněnou strategií vedení nástroje po kontuře. Použité řezné podmínky uvádí Tabulka 12. Obrázek 39 ukazuje moment z průběhu výrobního procesu. Stav obrobku po hrubování je viditelný níže, viz Obrázek 40.

Tabulka 12: Spodní matrice - konvenční metoda, použité řezné podmínky

a_p [mm]	a_e [mm]	f [mm/min]	n [ot/min]
2,4	6,8	1 300	1 300



Obrázek 39: Spodní matrice - konvenční metoda



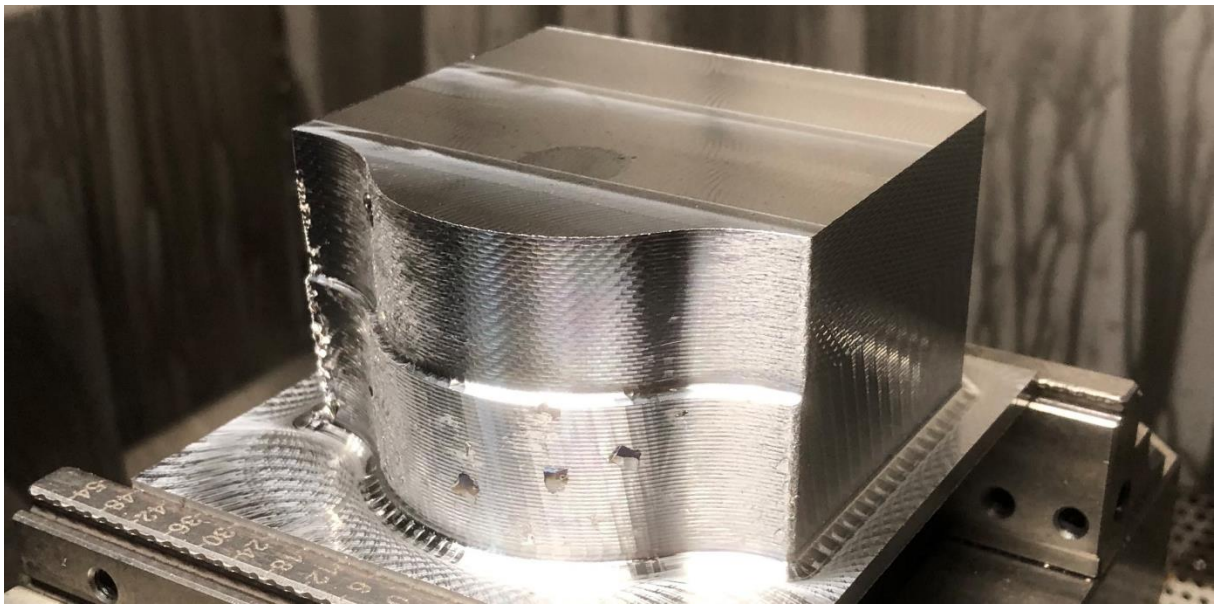
Obrázek 40: Spodní matrice - konvenční metoda, stav obrobku po hrubování

5.2.2 Vysokoposuvové frézování

Hrubovací strategie využitím vysokoposuvového frézování byla obdobná jako v případě konvenční metody. Jako nástroj byla opět použita vysokoposuvová fréza SECO R217.21-1640.RE-LO06.5A s řezným průměrem 40 mm. Použité řezné podmínky uvádí Tabulka 13. Pro totožnost strategie frézování je uveden pouze výsledný tvar součásti po úseku hrubování, viz. Obrázek 41.

Tabulka 13: Spodní matrice - vysokoposuvové frézování, použité řezné podmínky

a_p [mm]	a_e [mm]	f [mm/min]	n [ot/min]
0,6	6,7	5 000	1 430



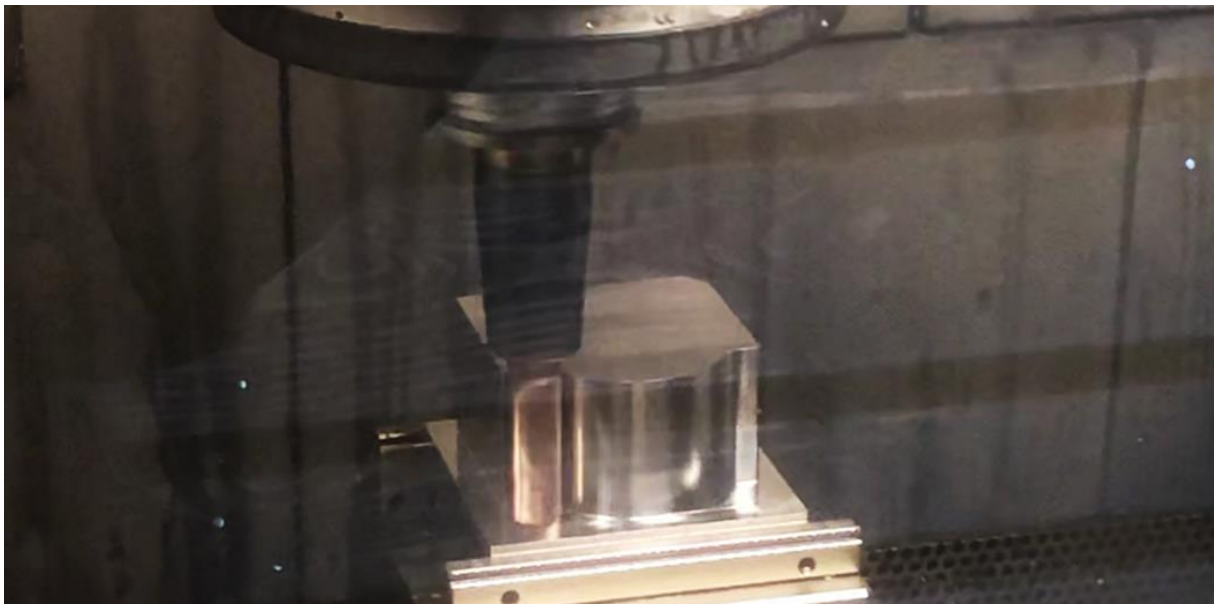
Obrázek 41: Spodní matrice - vysokoposuvové frézování, stav obrobku po hrubování

5.2.3 Trochoidní frézování

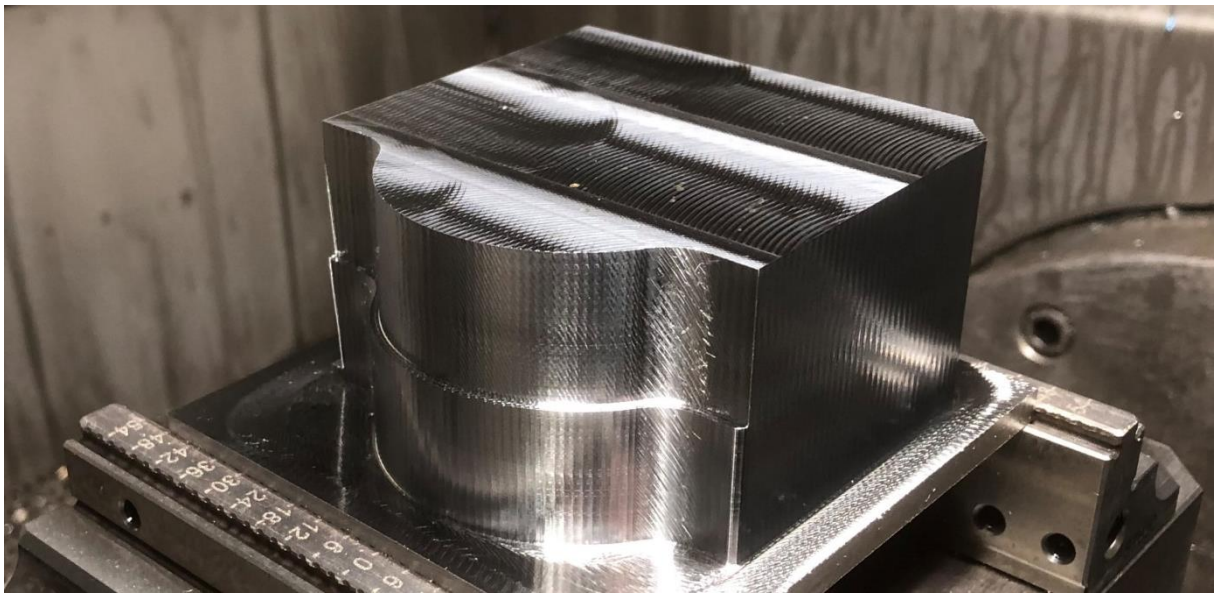
Poslední použitou metodou výroby bylo nasazení trochoidního frézování. Použitým nástrojem byla opět stopková trochoidní fréza JSV JSWF-16-44-44-92-16-6-41 s řezným průměr 16 mm. Na rozdíl od předešlých dvou metod obrábění bylo v tomto případě, díky konstrukci nástroje, při hrubování obvodových rozměrů možné využít větší řezné délky nástroje, viz. Obrázek 42. Konečný tvar obrobku po hrubování metodou trochoidního frézování znázorňuje Obrázek 43. Použité řezné podmínky uvádí Tabulka 14.

Tabulka 14: Spodní matrice - trochoidní frézování, použité řezné podmínky

a_p [mm]	a_e [mm]	f [mm/min]	n [ot/min]
44	0,5	5 000	3 182



Obrázek 42: Spodní matrice - trochoidní frézování



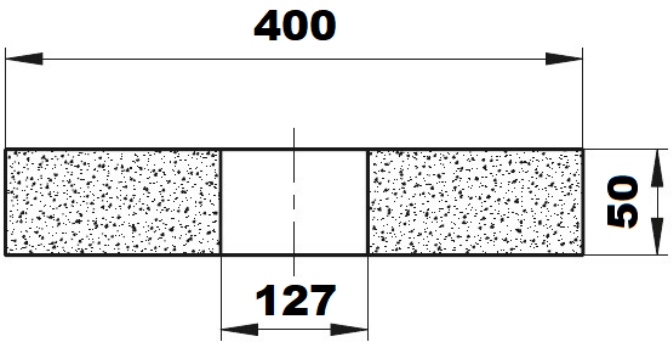
Obrázek 43: Spodní matrice - vysokoposuvové frézování, stav obrobku po hrubování

5.2.4 Dokončování

V průběhu následujícího testování životnosti vyrobených nástrojů bude největší pozornost věnována spodní matrici. Tento nástroj je totiž v průběhu výrobního procesu zpravidla nejvíce opotřebováván, v důsledku čehož, po dosažení životnosti nástroje, dochází k výměně celého páru matric za nové. Největšímu opotřebení podléhají zejména střižné hrany tohoto nástroje, na jejichž výslednou podobu mají obecně největší vliv finální výrobní operace. Z tohoto důvodu bude popis výroby spodní matrice zaměřen na dokončovací operace výroby.

Zakalená vyráběná součást byla broušena na plocho jednostranně na míru 40 -0,05/-0,1 mm. Broušena byla svrchní funkční plocha, do které je vyveden otvor Ø 11,9 H7. Proces probíhal na CNC rovinné brusce za použití chladící kapaliny pomocí brusného kotouče určeného pro broušení kalené oceli do hodnoty tvrdosti 67 HRc, viz. parametry Tabulka 15. [33]

Tabulka 15: Parametry nástroje - broušení [33]

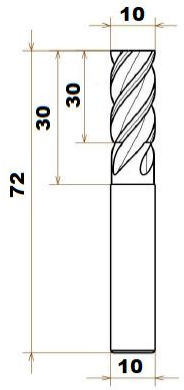
Brusný kotouč **T1 400x50x127mm 80A 54 I9 AV217-P23**	**Parametry**	
	**Tvar**	ploché
	Složení	umělý růžový korund s pojivem keramickým
	Zrnitost	54 (střední)

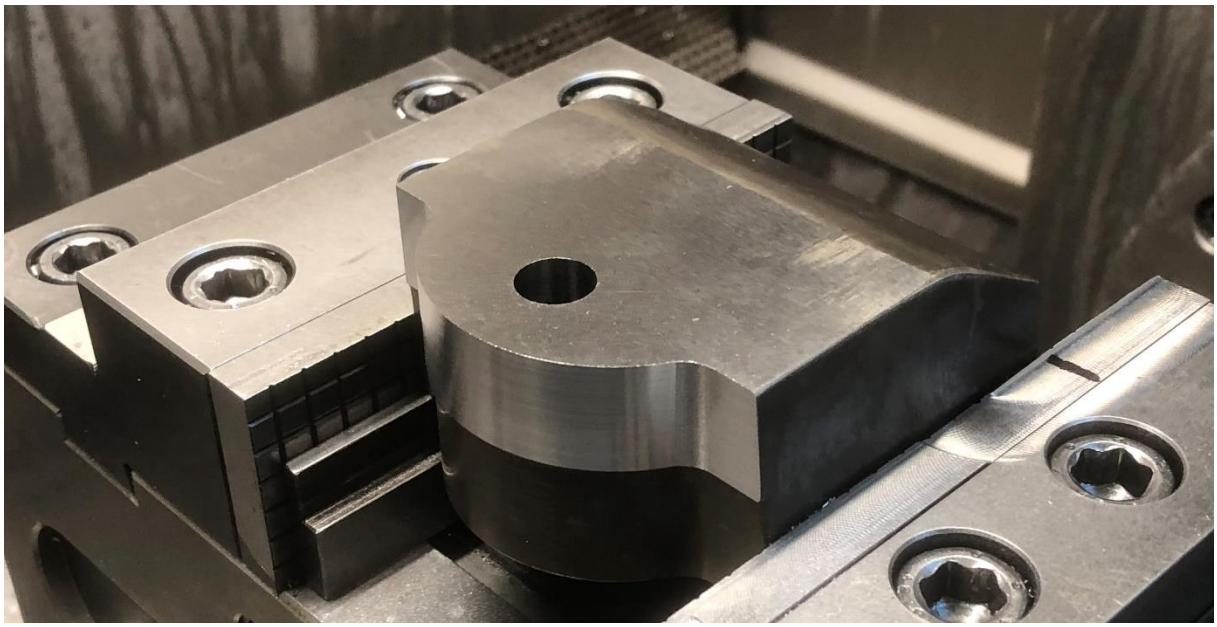
Po broušení následovalo frézování tvarové části R 29,5 ±0,02 mm a otvoru Ø 11,9 H7. Tvarová část byla dokončena frézováním bokem nástroje strategií vedení nástroje po kontuře. Dokončení bylo provedeno na 4 finální řezy. Otvor byl dokončen strategií vedení nástroje po šroubovici s krokem dolů 0,8 mm. Použité řezné podmínky uvádí Tabulka 16. Oba úseky výrobní operace byly provedeny stejným výrobním nástrojem, viz. Tabulka 17. Stav vyráběné součásti po dokončovacích operacích frézování ukazuje Obrázek 44.

Tabulka 16: Použité řezné podmínky - dokončování spodní matrice

a_p [mm]	a_e [mm]	f [mm/min]	n [ot/min]
na konečný rozměr obráběné plochy	0,1	500	2000

Tabulka 17: Parametry nástroje - dokončení spodní matrice [32]

Tělo **JSV** **JSF-UT-LANG-10-30-30-72-10-4-41**	**Doporučené řezné podmínky**	
	v_c [m/min]	80 - 140
	a_p [mm]	15 – 20
	f_z [mm/zub]	0,02 – 0,03



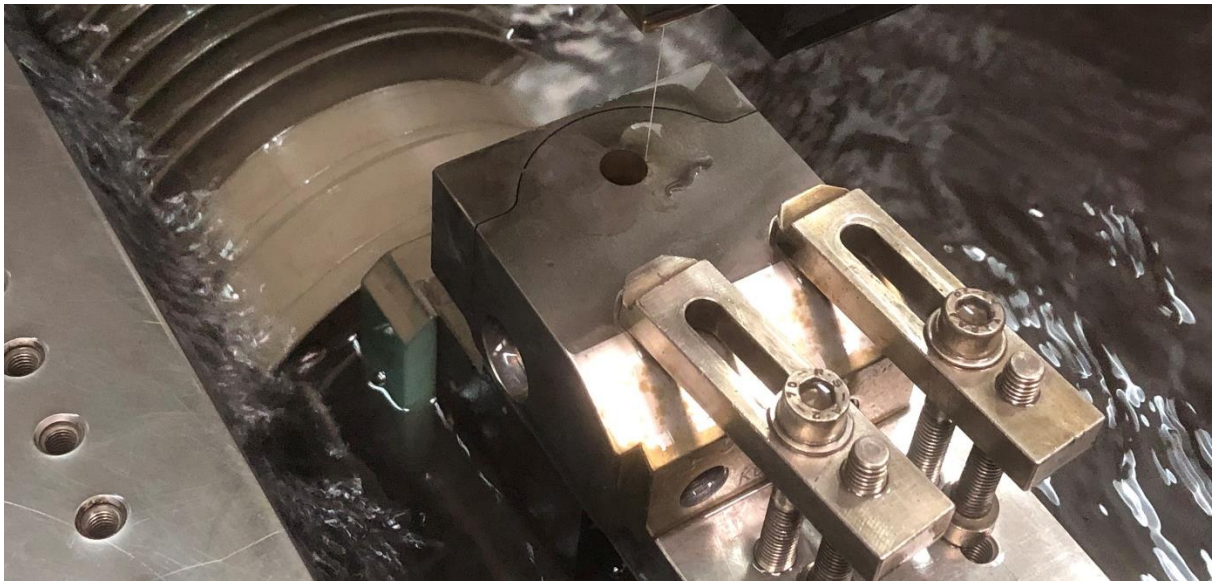
Obrázek 44: Spodní matrice - stav po dokončovacích operacích frézování

Po následném odjehlení (s ohledem na střižné hrany) vyráběné součásti byly svrchní broušená plocha a čelní tvarová plocha s R 29,5 ±0,02 mm leštěny. Leštění bylo provedeno za pomoci leštičky, plstěného válcového leštícího tělíska a leštící pasty s jemnou zrnitostí (1500). Vyráběná součást byla leštěna z důvodu předepsané hodnoty drsnosti Rz 1 μm dle technického výkresu pro svrchní funkční plochu. Zároveň bylo rozhodnuto i pro leštění čelní tvarové plochy. Důvodem leštění, kromě dosažení lepší hodnoty drsnosti povrchu, byla i snaha o zaoblení střižných hran po předchozích operacích broušení a frézování.

5.3 Výroba svrchní matrice

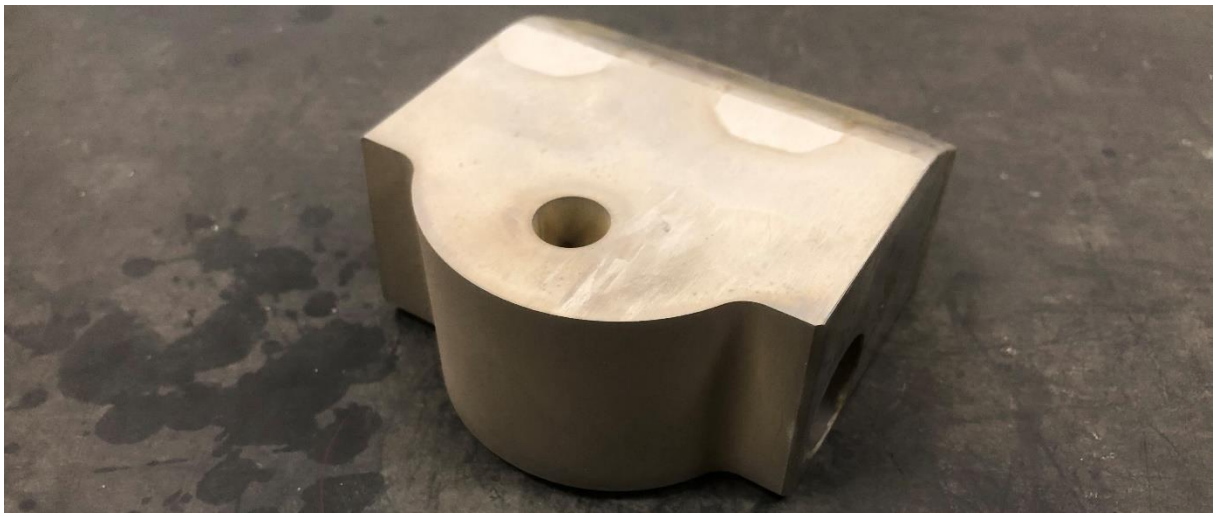
Z hlediska následného testování životnosti, a pro úplnost popisu výroby vybraných výrobních nástrojů, bude popsána také výroba svrchní matrice, opět se zaměřením na dokončovací výrobní operace.

Obdobně jako v případě výroby spodní matrice, byla vyráběná součást na horní funkční tvarové ploše broušena na plocho jednostranně na míru 40 -0,05/-0,1 mm. Výrobní zařízení a použitý výrobní nástroj byly stejné, jako v předchozím případě, viz. Tabulka 15. Následná výroba tvarové části s R 30 ±0,02 mm a otvoru Ø 11 H7 byla provedena na výrobním zařízení AgieCharmilles AC Progress VP3 technologií elektroerozivního drátového řezání. K výrobě byl použit drát průměru 0,3 mm. Nejprve proběhlo řezání vnitřního, již předvrtaného, otvoru Ø 11 H7, následovalo řezání tvarové části R 30 ±0,02 mm, viz. Obrázek 45. Tyto úseky výrobní operace byly provedeny s přídavkem 0,1 mm na plochu. Následné dokončení vnitřního otvoru i vnější tvarové části proběhlo řezáním na 2 finální dráhy. Stav vyráběné součásti po elektroerozivním drátovém řezání znázorňuje Obrázek 46.



Obrázek 45: Svrchní matrice – průběh elektroerozivního drátového řezání

Po zhotovení tvarových prvků proběhlo odjehlení a leštění vyráběné součásti obdobným způsobem jako v případě spodní matrice.



Obrázek 46: Svrchní matrice - stav po elektroerozivním drátovém řezání

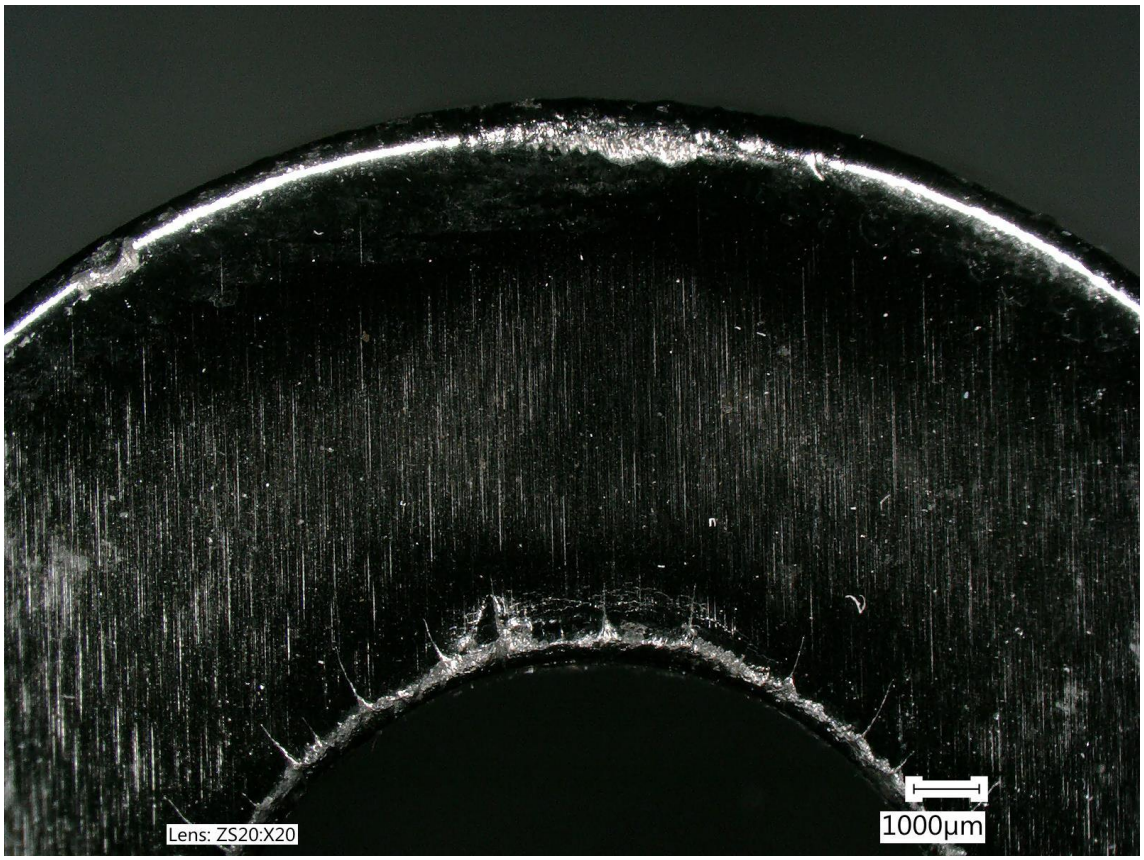
6 Testování životnosti

Druhou stěžejní etapou tohoto zadání bylo testování životnosti vyrobených nástrojů, které odpovídal počet kusů zploštění vyrobených daným nástrojem. Testování proběhlo ve výrobním provozu společnosti zabývající se výrobou dílů pro oblast automotive. U nástrojů byl, kromě samotného měření životnosti, sledován i průběh jejich opotřebení. Na základě charakteru sledovaného opotřebení byly následně stanoveny jeho možné příčiny, což poté vedlo k vytvoření návrhů, kterými by bylo možné životnost nástrojů dále zvýšit.

6.1 Analýza současného stavu

Před zahájením měření bylo možné provést analýzu na základě výstupů z minulosti, kdy proběhly zkoušky obdobných variant nástrojů. V současnosti se u svrchní a spodní matrice využívá chlazení vodou. Z dostupných dat bylo možné zjistit životnost nástrojů bez a s použitím vodního chlazení. U varianty s chlazením došlo téměř k trojnásobnému zvýšení životnosti, kdy matrice dosáhly životnosti 47 000 vyrobených kusů zploštění. Po vyřazení matric z provozu bylo mikroskopem sledováno opotřebení střižných hran, viz. Obrázek 47, Obrázek 48.

Obrázek 47: Analýza současného stavu - trhliny



Obrázek 48: Analýza současného stavu - opotřebení vnější řezné hrany

Ze snímků jsou patrná opotřebení střižných hran. Viditelné jsou trhliny vzniklé zejména po obvodu vnitřního střižného otvoru. Pozorovatelné je taktéž opotřebení formou otěru, kdy místy došlo k viditelnému sražení/zaoblení střižné hrany. U vnější střižné hrany, viz. Obrázek 48, je po její délce viditelný vzniklý rádius a v určitých místech i vydrolené částice materiálu. V obou případech již téměř nelze mluvit o ostré hraně. Na základě snímků je do budoucna možné předpokládat obdobný charakter opotřebení.

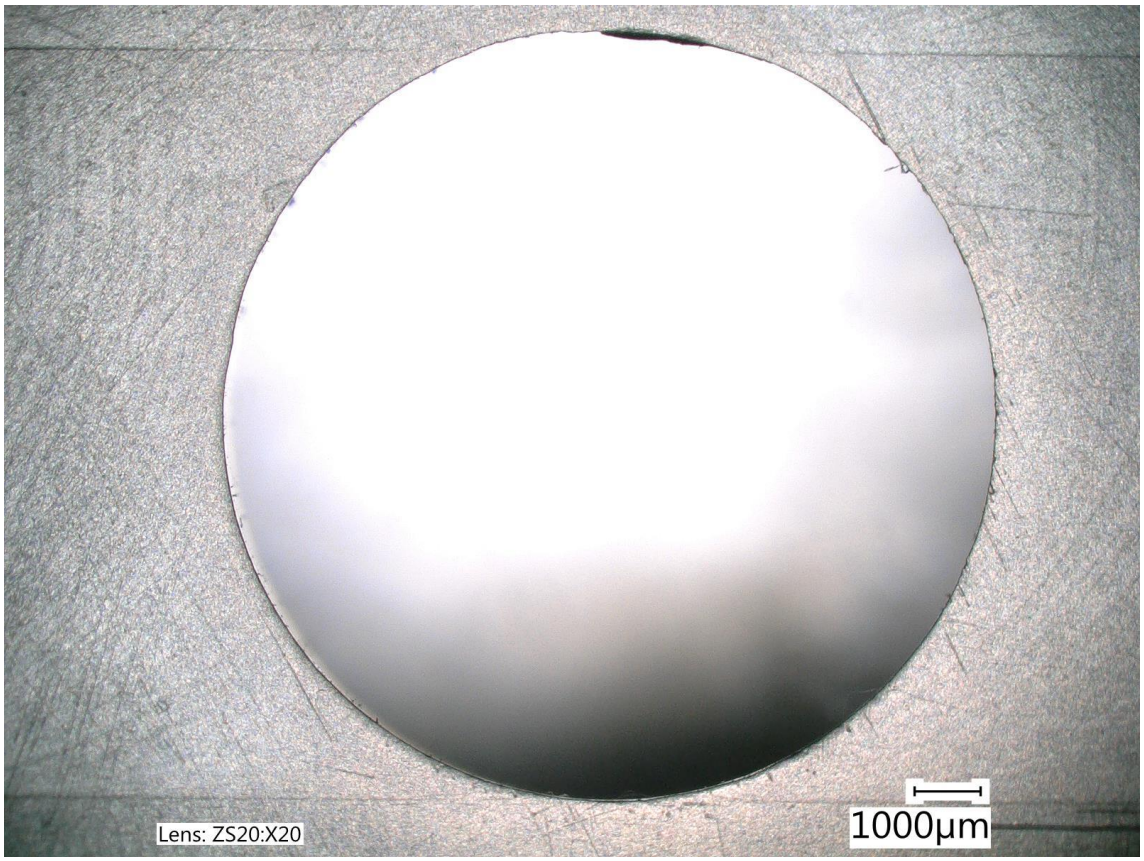
Kromě skutečnosti, že u nástrojů dochází k opotřebení určitého charakteru, je vhodné se zabývat i jeho příčinami. V případě trhlinek, nebo přesněji tzv. hřebenových trhlinek vzniklých kolmo na ostří, se jedná o formu únavového opotřebení, které může vzniknout tepelným šokem. Rizikem při tvorbě trhlin je vylamování částic řezného materiálu mezi jednotlivými trhlinami, což může náhle vyvolat následný lom břitu. Příčinou tvorby trhlin může být kromě nesprávně zvolených řezných parametrů i špatný způsob chlazení, kdy může být správným řešením i celková absence chlazení. Vznik sražení či zaoblení vnitřní střižné hrany lze přičíst výrobnímu procesu, v jehož průběhu dochází ke stříhání otvoru na zploštělém konci tyče. Jedná se s největší pravděpodobností o abrazivní formu opotřebení, kdy je řezná hrana vystavena působení střiženého materiálu. Opotřebení je nicméně po obvodu střižného otvoru nerovnoměrné, viz. Obrázek 47, způsobené pravděpodobně nerovnoměrným silovým namáháním od střižného kolíku. Pokud se zaměříme na opotřebení vnější střižné hrany matrice, viz. Obrázek 48, můžeme sledovat rovnoměrné opotřebení ve tvaru zaoblení způsobené opět nejspíše abrazí mezi ostřím a odebíraným materiálem. Jsou zde zároveň viditelná místa vydroleného ostří, způsobeného pravděpodobně vysokým mechanickým namáháním v důsledku přerušovaného řezu, kdy v kombinaci se střižným nožem dochází opakovaně k zastřihnutí konce tyče. Úlomky ostří v oblasti vnitřního střižného otvoru lze do značné míry taktéž přičíst cyklickému namáhání nástroje. [34]

6.2 Vlastní testování životnosti

Samotné testování proběhlo v prostředí výrobního provozu. Tato skutečnost byla, zejména z důvodů dodávek materiálu a plánování výroby, limitující pro množství otestovaných nástrojů. Ve výsledku bylo možné plně otestovat jeden pár matric vyrobených konvenční metodou, u kterých byl sledován i průběh jejich opotřebení. Dosažené výsledky tedy nebylo možné statisticky zhodnotit.

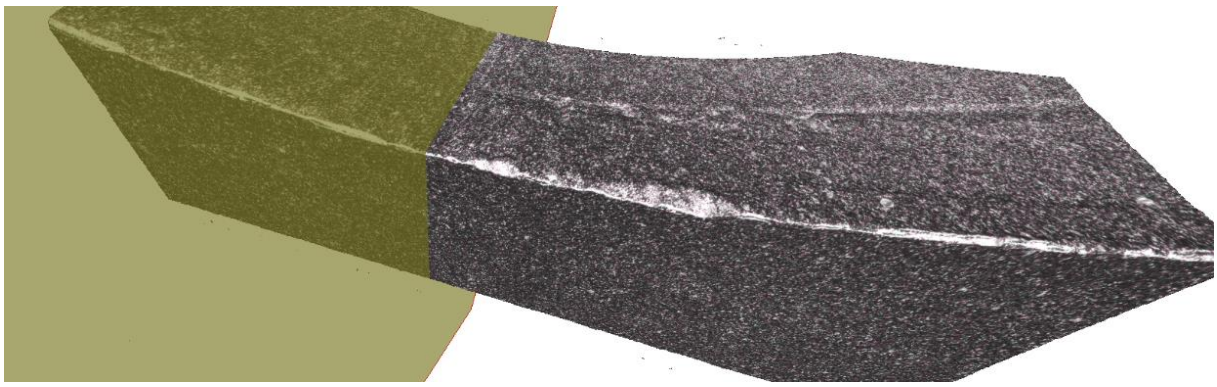
Nástroje byly systémem vnitřních kanálků chlazeny vodou a k vnitřnímu otvoru spodní matrice Ø 11,9 H7 / Ø 14 mm bylo přivedeno chlazení proudem stlačeného vzduchu. Důvodem přídavného chlazení vzduchem ke spodní matrici je obecně její vyšší teplotní zatížení v průběhu výroby. Ze zkušeností z výrobního provozu je jako první z nástrojů opotřebena právě spodní matrice, následkem čehož dochází k výměně celého páru matric. Z důvodu vyššího opotřebení spodní matrice, a zejména jejího vnitřního střižného otvoru, byla vyšší pozornost zaměřena na tento nástroj. Životnost střižného nože se oproti životnosti matric pohybuje ve vyšších hodnotách, a proto nebylo možné opotřebení tohoto nástroje v rámci sledovaného období zhodnotit. Střižný kolík nebyl předmětem testování.

Nástroje byly pozorovány mikroskopem Alicona InfiniteFocus. Bližší pozornost byla věnována vnitřnímu střižnému otvoru spodní matrice, viz. Obrázek 49. Ze snímku nástroje před testováním bylo možné zhodnotit zejména okolní povrch střižného otvoru, na kterém byly viditelné určité stopy po předchozích dokončovacích operacích.

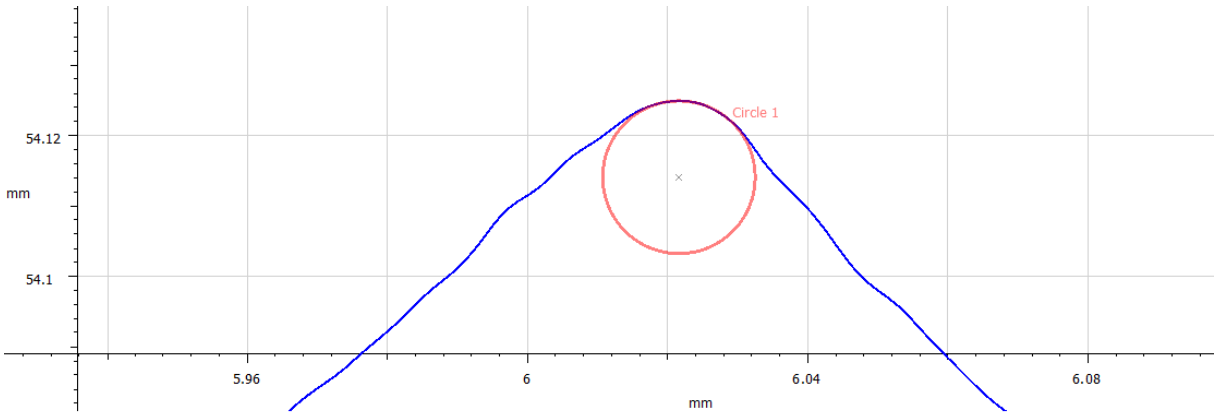


Obrázek 49: Spodní matrice před testováním – vnitřní otvor

K podrobnějšímu zhodnocení střižných hran nástroje byla pomocí 3D optického profilometru pořízena 3D topografie břitů nástroje. Z příčného profilu střižné hrany vykresleného do grafu byla získána hodnota parametru rádiusu břitu střižné hrany.

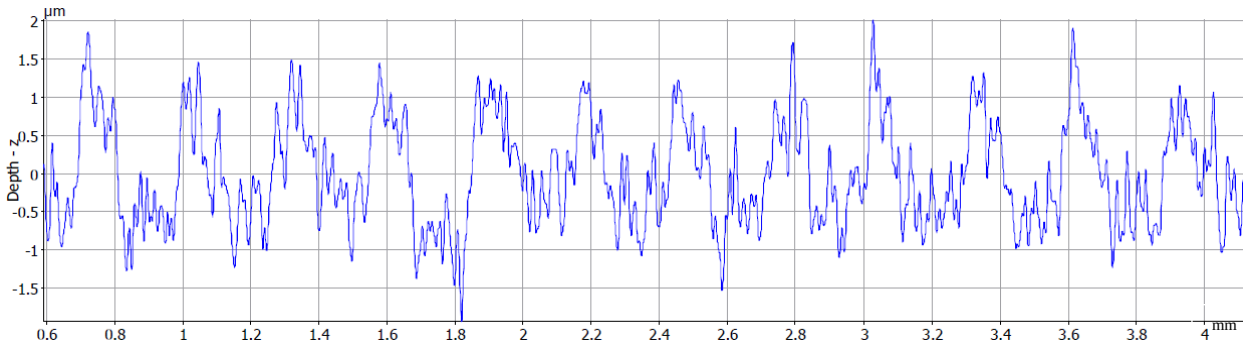


Obrázek 50: Topografie vnitřního střižného otvoru před opotřebením– spodní matrice



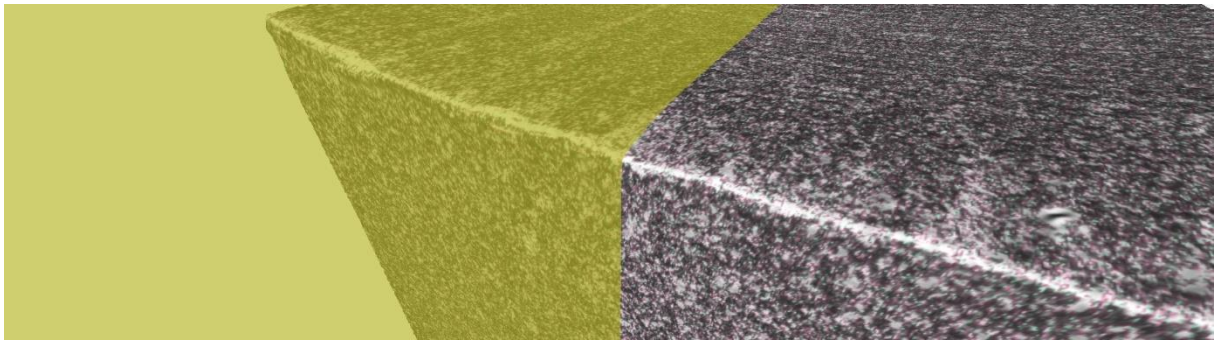
Obrázek 51: Graf příčného profilu vnitřního střižného otvoru před opotřebením – spodní matrice

Obrázek 50 zobrazuje hranu vnitřního střižného otvoru spodní matrice. Do grafu, viz. Obrázek 51, je promítnut příčný profil střižné hrany. Z výstupních dat měření bylo možné získat parametr rádiusu střižné hrany r = 10,906 µm. V místě měření rádiusu je možné sledovat také drobná sražení střižné hrany. V okolí sledovaného střižného otvoru byla vyhodnocena drsnost povrchu, viz. Obrázek 52. Průměrná hodnota drsnosti byla softwarem vypočtena jako Rz = 3,298 µm.



Obrázek 52: Graf drsnosti povrchu v okolí vnitřní střižné hrany

Pro následné srovnání je uveden záznam z pozorování a měření střižné hrany vnitřního otvoru svrchní matrice, viz. Obrázek 53. V tomto případě byl naměřen rádius střižné hrany r = 5,795 µm. Vyhodnocena byla také drsnost v okolí střižné hrany s průměrnou hodnotou Rz = 3,505 µm.

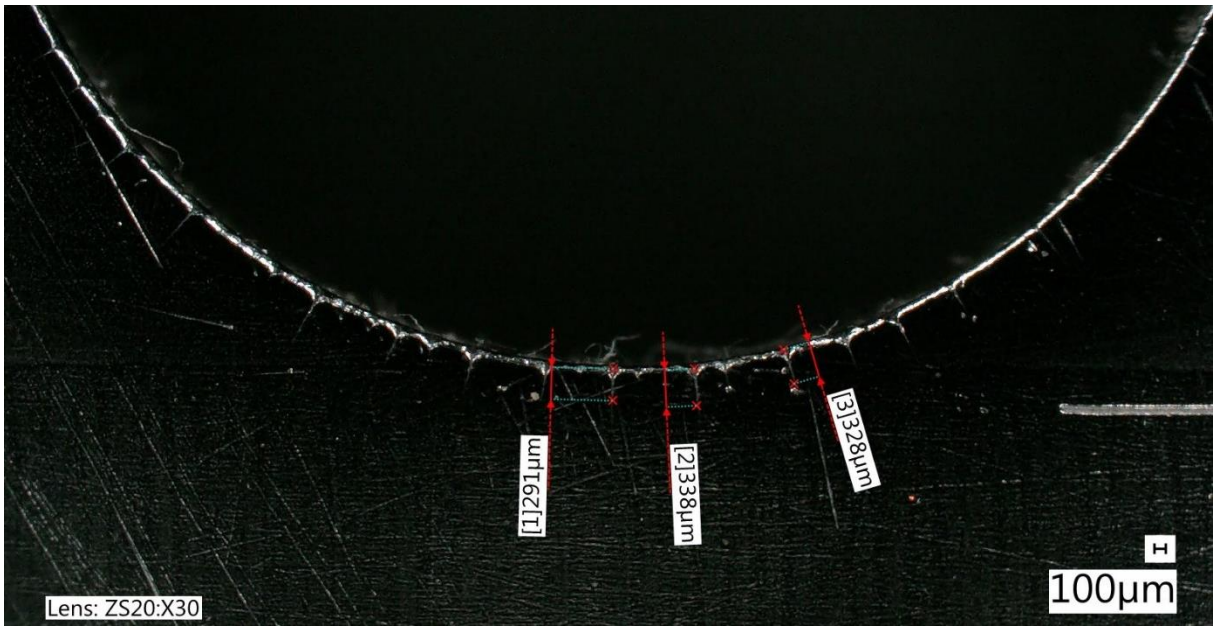


Obrázek 53: Topografie vnitřního střižného otvoru před opotřebením – svrchní matrice

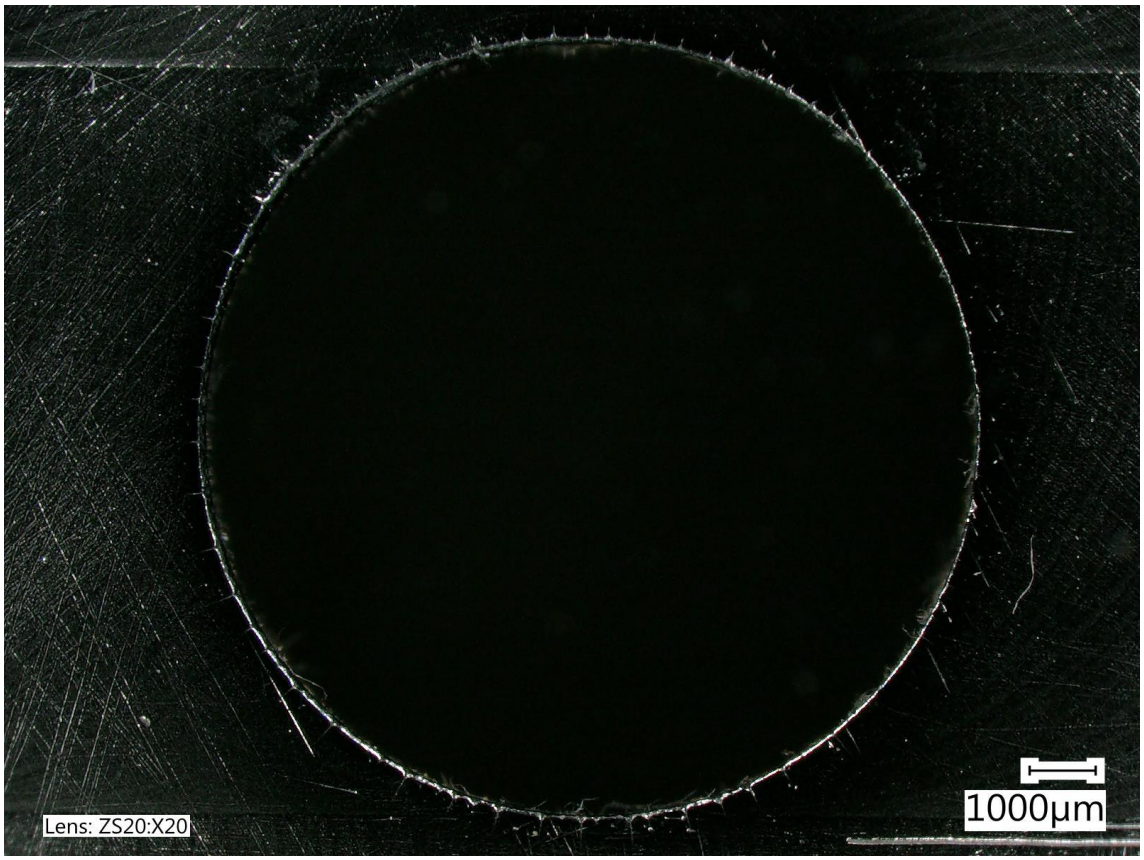
Po pozorování nástrojů bylo možné přejít k fázi samotného testování. To bylo realizováno v prostředí výrobního provozu v rámci sériové výroby stabilizátorů. Testované nástroje byly z lisovacího zařízení vyjmuty po 3 000, 6 000 a 27 000 ks vyrobených zploštění, kdy byl pozorován průběh a charakter jejich opotřebení. Hlavní pozornost byla věnována sledování stavu střižné hrany vnitřního otvoru spodní matrice.

6.2.1 Stav nástroje po 3 000 vyrobených kusech

První interval, po kterém bylo sledováno opotřebení střižné hrany, byl 3 000 kusů vyrobených zploštění. Na snímcích z mikroskopu, viz. Obrázek 54, Obrázek 55, je možné pozorovat charakter opotřebení střižné hrany a blízkého okolí tvářecí plochy. Po obvodu střižné hrany je viditelná tvorba a šíření trhlin, které místy dosahují hodnot kolem 300 µm. Na tvářecí ploše v okolí střižné hrany je možné sledovat stopy po kontaktu s tvářeným materiálem v podobě křížených rýh.

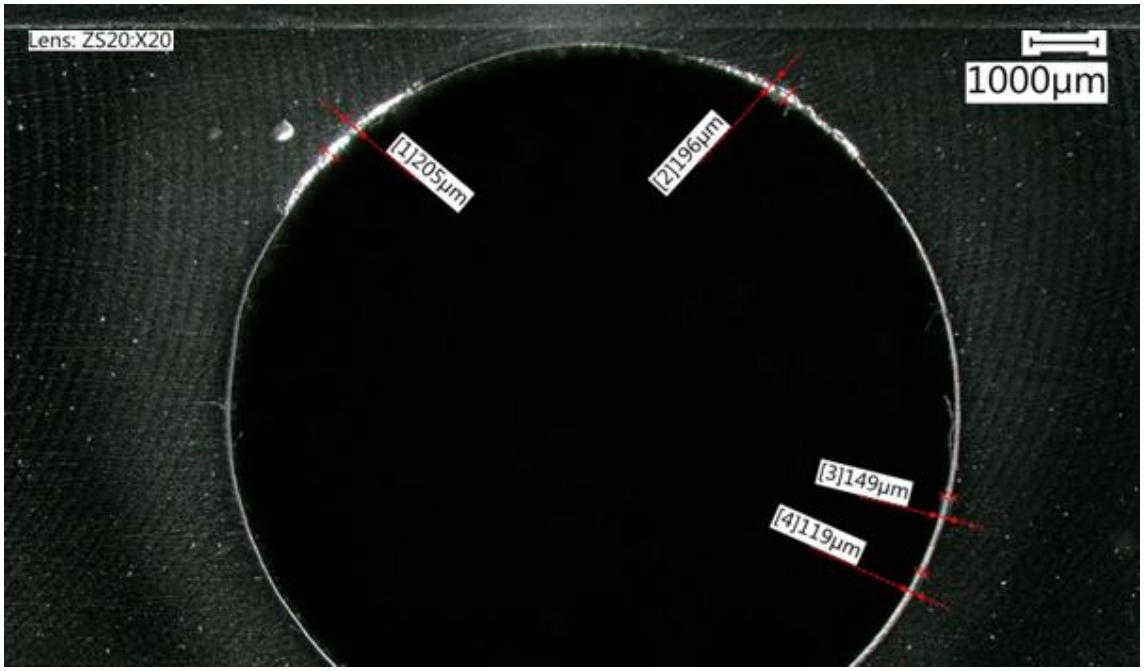


Obrázek 54: Opotřebení po 3 000 ks - spodní matrice, detail



Obrázek 55: Opotřebení po 3 000 ks - spodní matrice

Pro srovnání je uveden pohled na opotřebení svrchní matrice, viz. Obrázek 56. Zde není viditelná významná tvorba trhlin jako v přechozím případě. Naopak je možné pozorovat opotřebení formou drobných sražení střižné hrany, která místy dosahují hodnot okolo 200 µm.

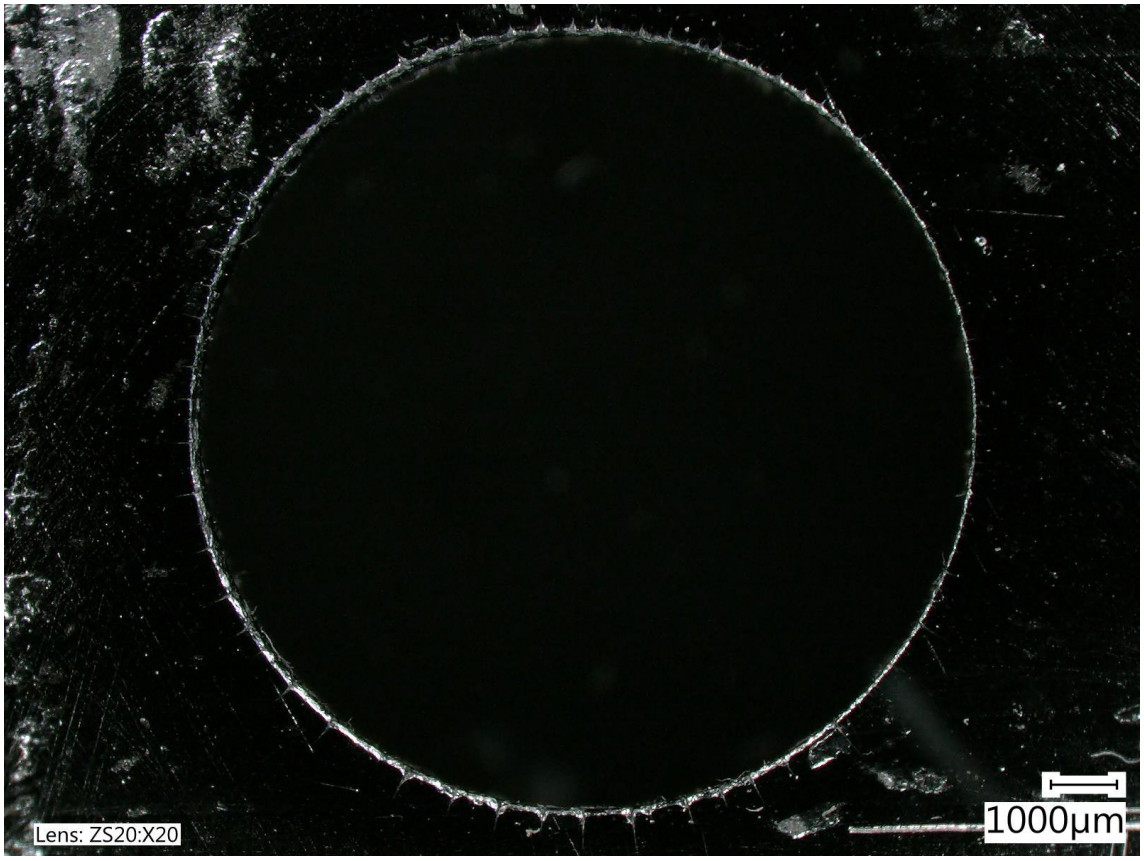


Obrázek 56: Opotřebení po 3 000 ks - svrchní matrice

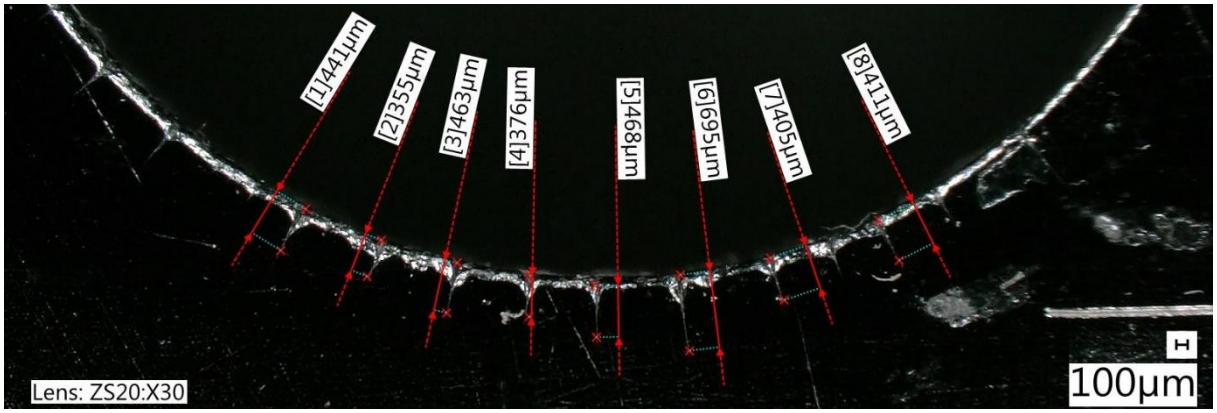
Po sledování a zhodnocení stavu byly výrobní nástroje znovu upnuty v lisovacím zařízení a proces výroby zploštění pokračoval opět v intervalu 3 000 vyrobených kusů.

6.2.2 Stav nástroje po 6 000 vyrobených kusech

Po dokončení výrobního intervalu dalších 3 000 kusů vyrobených zploštění proběhlo opět pozorování stavu výrobních nástrojů. Při pohledu na celý obvod střižné hrany otvoru spodní matrice, viz. Obrázek 57, je viditelné pokračující šíření trhlin. To dokazují i rozměry trhlin pohybující se v hodnotách cca 400 – 700 µm, viz. Obrázek 58. V místech trhlin je možné pozorovat již zjevné vydrolování materiálu břitu. Při pohledu na tvářecí plochu v okolí střižné hrany je patrné nalepování tvářeného materiálu a zároveň i poškození povlaku formou jeho odlupování od základního materiálu.



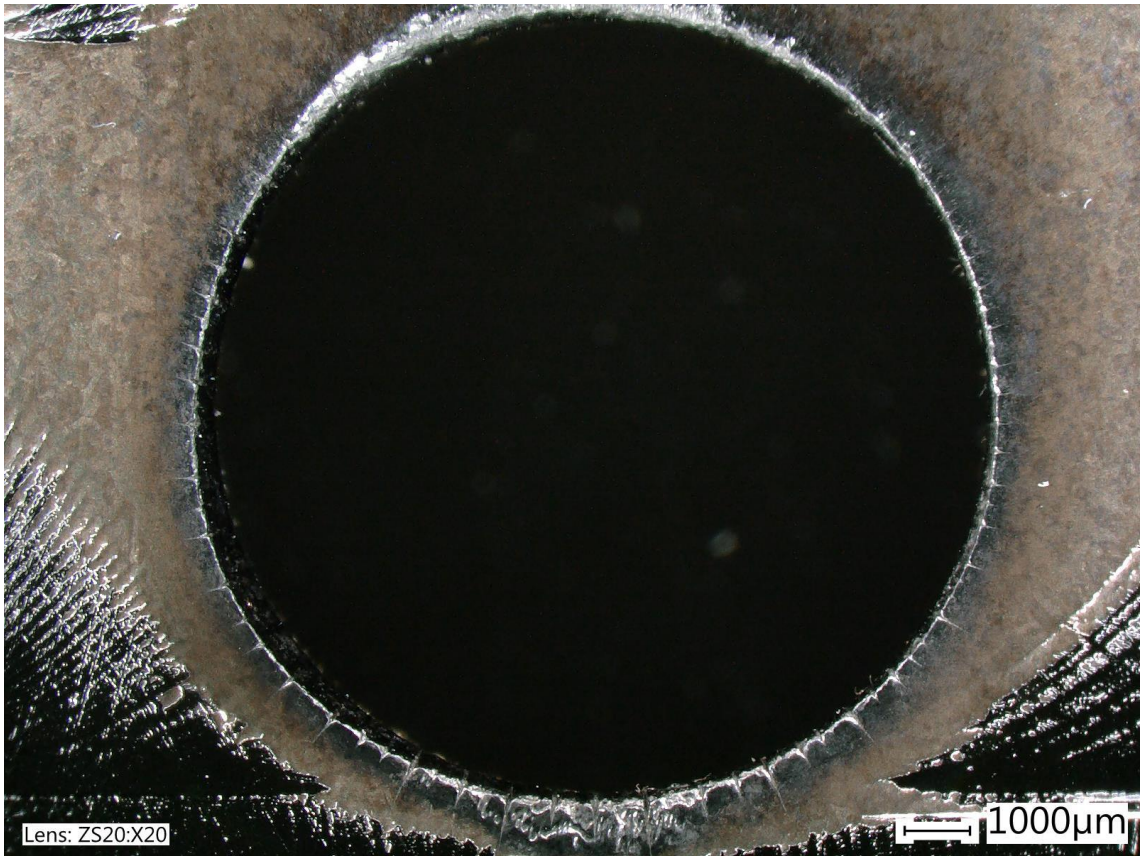
Obrázek 57: Opotřebení po 6 000 ks - spodní matrice



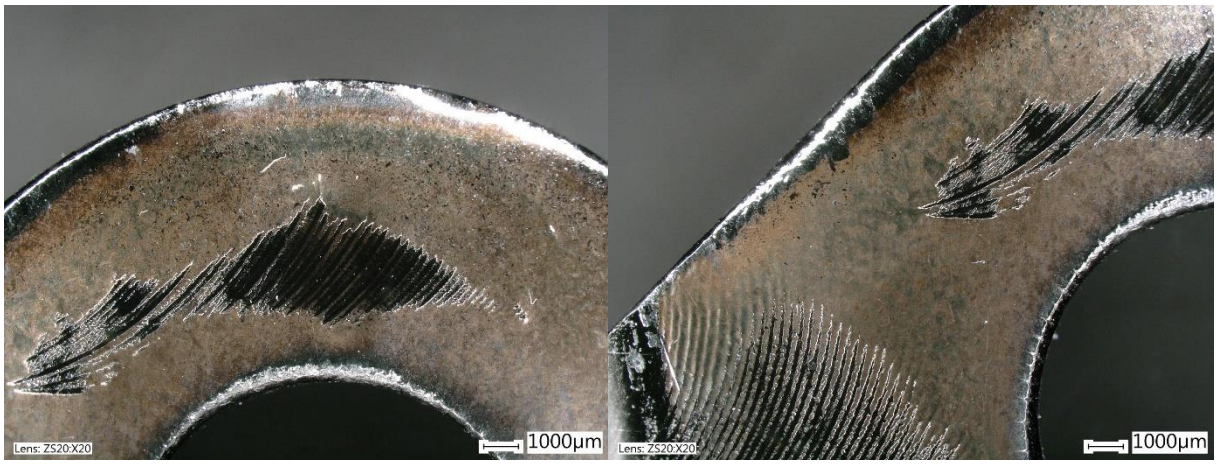
Obrázek 58: Opotřebení po 6 000 ks - spodní matrice, detail

6.2.3 Stav nástroje po 27 000 vyrobených kusech

Po předchozím pozorování byly výrobní nástroje nasazeny zpět do výrobního procesu, který probíhal až do konečného opotřebení spodní matrice a následného vyřazení celého páru matric z výrobního procesu. Stav opotřebení nástrojů je opět znázorněn na snímcích níže. Po obvodu střižné hrany je patrné poškození ostří formou trhlin, vydrolování materiálu ostří a opotřebení otěrem od materiálu tlačeného kolíkem skrz střižný otvor, viz. Obrázek 59. V okolí střižné hrany je taktéž zřetelné poškození povlaku. Chybějící povlak je možné pozorovat i na ploše mezi vnější a vnitřní střižnou hranou, viz. Obrázek 60. Na ostří vnější střižné hrany je viditelné opotřebení otěrem a v důsledku toho vzniklé zaoblení a místy sražení střižné hrany.

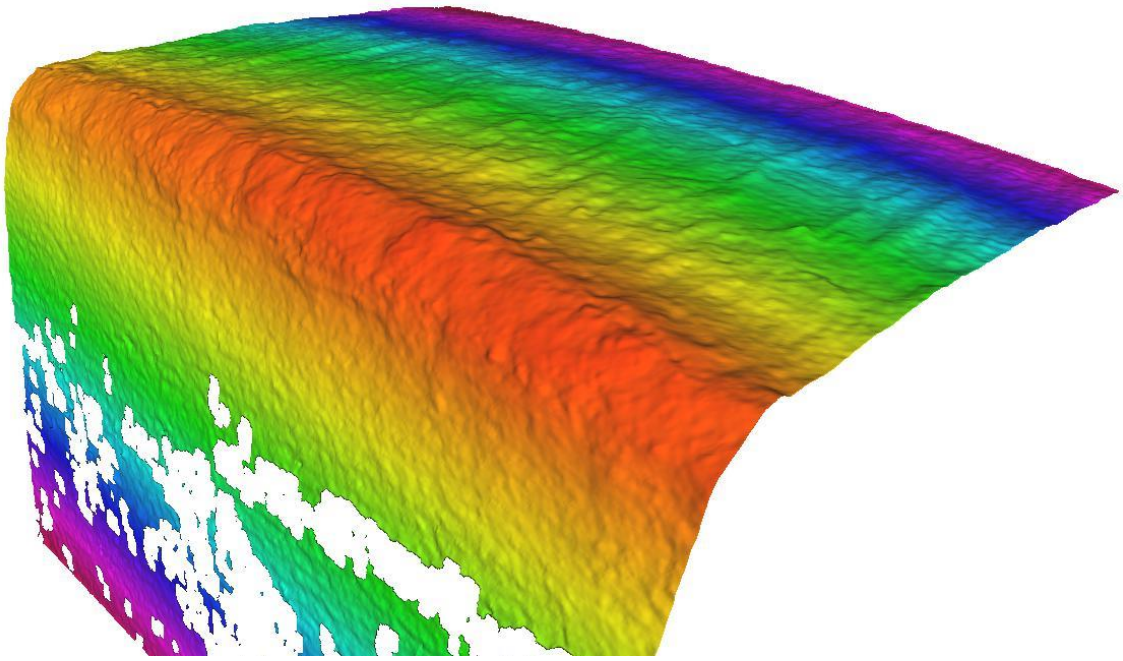


Obrázek 59: Opotřebení po 27 000 ks - spodní matrice

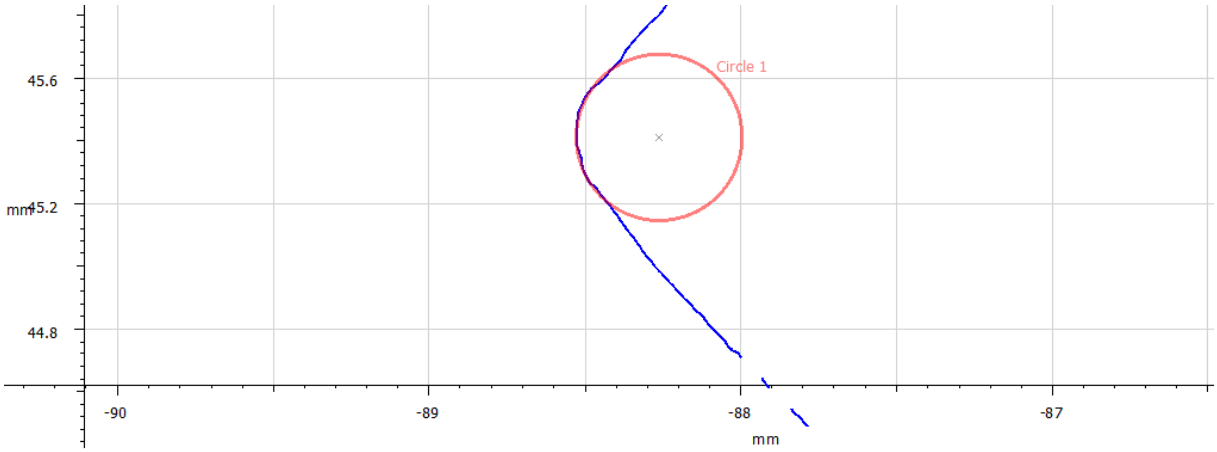


Obrázek 60: Opotřebení po 27 000 ks - spodní matrice, detail

K podrobnějšímu zhodnocení stavu vnitřní střižné hrany byla opět pořízena 3D topografie břitu, viz. Obrázek 61. Ze snímku je po sledované délce střižné hrany možné pozorovat zřetelnou tvorbu nárůstku. Ulpívání materiálu dokazuje i hodnota rádiusu ostří, měřená z příčného profilu střižné hrany, viz. Obrázek 62. V místě pozorování byl naměřen rádius ostří střižné hrany r = 266,533 µm.

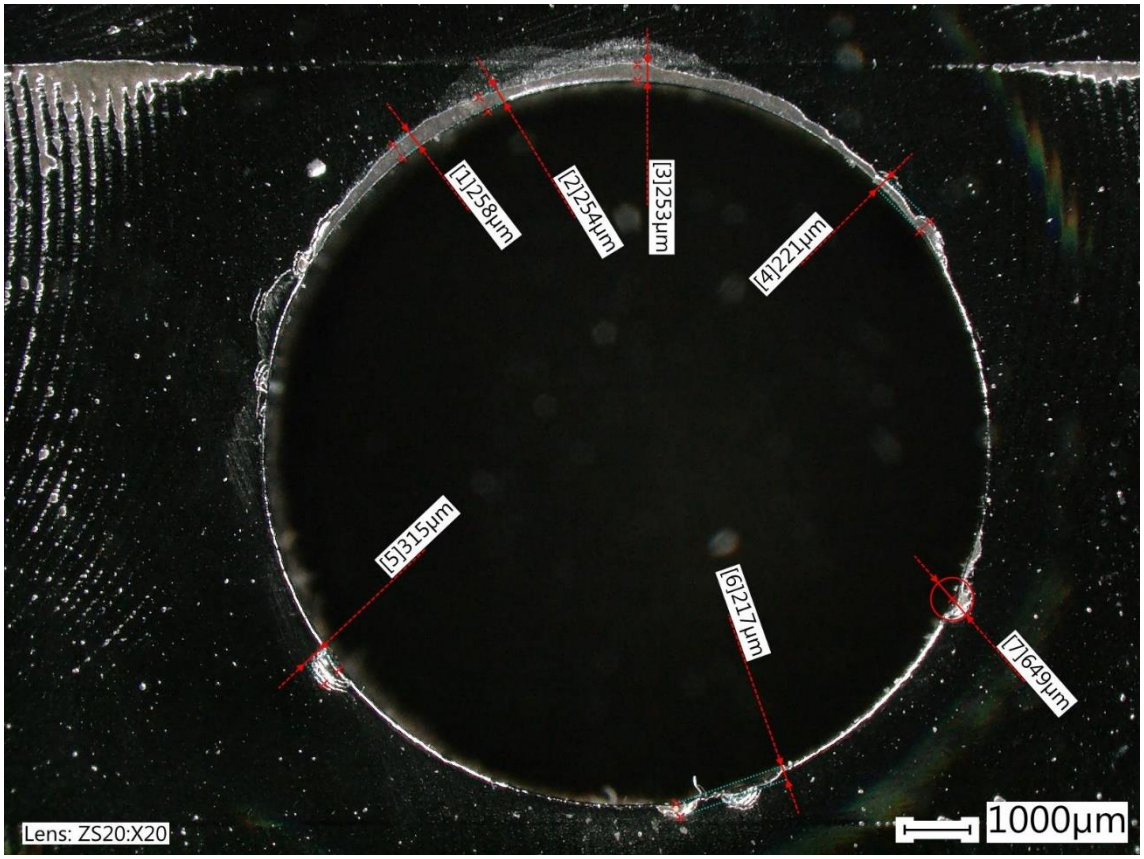


Obrázek 61: Topografie vnitřního střižného otvoru po opotřebení – spodní matrice

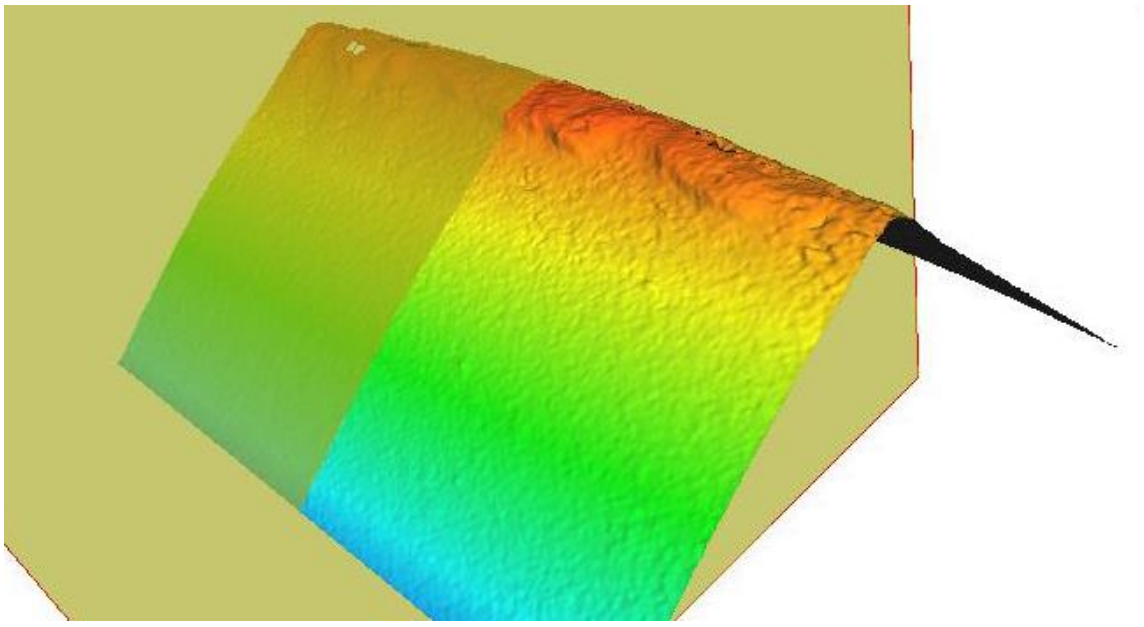


Obrázek 62: Graf příčného profilu vnitřního střižného otvoru po opotřebení – spodní matrice

Pro srovnání opotřebení je uveden pohled na střižný otvor svrchní matrice. Pozorované opotřebení není tak rozsáhlé, jako v případě spodní matrice. Po obvodu střižné hrany jsou viditelné stopy po vydrolování břitu. Zároveň je v okolí střižné hrany patrné poškození povlaku. Ostří vnitřní střižné hrany bylo taktéž sledováno podrobněji pomocí 3D topografie, kdy byla opět prokázána tvorba nárůstku. V konkrétním místě byla naměřena hodnota rádiusu ostří r = 194,942 µm.



Obrázek 63: Opotřebení po 27 000 ks - svrchní matrice



Obrázek 64: Topografie vnitřního střižného otvoru po opotřebení – svrchní matrice

6.3 Příčiny opotřebení nástrojů

Opotřebení řezného nástroje je důsledkem působení fyzikálních a chemických faktorů, v důsledku čehož dochází k zatěžování břitu nástroje. V obecnosti dochází k otupení břitu otěrem, plastickou deformací nebo křehkým lomem. K otupení břitu otěrem dochází v případě každého obrábění řezáním a vyskytuje se v místech dotyku břitu s materiálem obrobku. Otěr je způsoben extrémními podmínkami tlakového napětí a teploty v těchto místech dotyku. Podle toho, zdali jsou příčinou vzniku otěru děje fyzikální nebo chemické povahy, rozlišujeme konkrétní druhy otěru. V případě dějů fyzikální povahy rozeznáváme abrazi (brusný otěr) a adhezi (přilnavost). Brusný otěr dopadá na všechny druhy řezných materiálů a je způsoben přítomností tvrdých částic v materiálu obrobku, které do materiálu břitu vyrývají mikroryhy. Adhezní otěr se naopak vyskytuje zejména u řezných materiálů chemicky příbuzných s obráběným materiálem. V důsledku adheze dochází ke vzniku mikrosvarů v místech bodového styku vrcholků nerovností materiálů břitu a třísky. Vzniklé svarové spoje se následně porušují, důsledkem čehož velké množství velmi tvrdých vytrhávaných částic zvyšuje abrazní otěr. [35]

Při otupení břitu křehkým lomem dochází k vylamování částí materiálu ostří. Riziko vzniku lomu souvisí s houževnatostí řezného materiálu neboli schopností materiálu absorbovat energii před jeho porušením a zamezit tak vzniku a růstu trhliny. Důvodem vzniku křehkého lomu je tedy u materiálu břitu překročení jeho meze pevnosti v ohybu. K tomu může dojít vlivem dynamických rázů (důsledek přerušovaného řezu), nevhodné geometrie břitu, případně nadměrného průřezu odřezávané vrstvy. Dalším důvodem vzniku křehkého lomu může být vznik trhlin kolmých na ostří vlivem teplotních šoků. Ke vzniku křehkého lomu může docházet také navařováním materiálu třísky důsledkem intenzivní adheze a následným vytrháváním částí materiálu břitu. [35] [36]

U testovaných nástrojů bylo možné pozorovat výše popsané druhy opotřebení. V oblastech střižných hran docházelo, již ze samotné podstaty řezného procesu, k brusnému otěru vlivem kontaktu řezného a odebíraného materiálu. Pokud zaměříme pozornost na vnitřní střižný otvor nástroje spodní matrice, můžeme již od počátku hodnocení opotřebení pozorovat tvorbu a šíření trhlin kolmých na ostří. Trhliny vznikají následkem teplotních rázů, jejichž příčinou je kolísání teploty břitu, přerušované řezy, nesprávný způsob chlazení, případně špatně zvolený materiál nebo povlak vzhledem k odebíranému materiálu. V souvislosti s šířením trhlin je patrné i vylamování částí ostří, jehož vznik opět souvisí s přerušovaným řezem a obecně vysokým mechanickým namáháním řezné hrany. Po obvodu vnitřního střižného otvoru je v určitých místech patrné výraznější opotřebení břitu brusným otěrem, viz. Obrázek 59 (horní a spodní část kružnice).

U zmíněných příčin vzniku opotřebení je možné nalézt spojitost s proběhlým procesem výroby zploštění. Koncová část torzní tyče, těsně před založením do pracovního prostoru mezi pár matric, je po celém obvodu zahřívána na výrazně vyšší teplotu, která umožňuje následný výrobní proces tváření a střihu. Výrobní nástroj (spodní matrice) je vnitřními kanálky chlazen vodou a vnitřní střižný otvor je navíc ochlazován proudem stlačeného vzduchu. Výrobní proces probíhá cyklicky s přestávkami mezi založením dalšího dílu. V důsledku těchto skutečností se lze domnívat, že v okolí ostří dochází ke kolísání teploty a teplotním rázům v důsledku možného prudkého ochlazení břitu. Dále v průběhu výrobního procesu dochází k vtlačování odebíraného materiálu kolíkem proti vnitřní střižné hraně. Na ostří vnitřní střižné hrany tedy dochází k cyklickému namáhání. Tyto vlivy jsou patrně příčinou vzniku a šíření trhlin a zároveň i vylamování části ostří v okolí vzniklých trhlin. Co se týče výraznějšího otěru střižného otvoru v jeho horní a spodní části kružnice, zde je možné opět nalézt spojitost s kolíkem vtlačujícím materiál vůči střižné hraně. Síly vzniklé od pohybu střižného kolíku mohou na střižený materiál

působit nerovnoměrně. Střižený materiál tedy způsobuje vyšší míru otěru v konkrétní oblasti vnitřního otvoru matrice podle charakteru silového působení. Střižný kolík je zároveň vedený průchozím otvorem svrchní matrice, neměl by tedy mít tendenci k vychylování z osy.

Ze snímků topografie vnitřní střižné hrany a měření velikosti rádiusu ostří je prokazatelné více jak 20násobné zvětšení hodnoty rádiusu ostří. Příčinou je s největší pravděpodobností adheze odebíraného materiálu na ostří nástroje způsobená vysokou teplotou řezného procesu a nepřítomností povlaku na břitu nástroje. Deponovaný povlak CrAlSiN by totiž jako takový měl zabránit nalepování obráběného materiálu na nástroj i při použití za vysokých teplot. Z pozorování opotřebení nástroje je nicméně zjevné poškození povlaku v okolí střižných hran.

Při hodnocení stavu hrany střižného otvoru svrchní matrice jsou viditelné prvky obdobného charakteru opotřebení jako v případě spodní matrice. Výjimkou je výrazně nižší rozsah opotřebení střižné hrany s absencí znatelných trhlin. V horní polovině kruhového otvoru je znatelnější vliv otěru. Po obvodu střižné hrany jsou patrná místa vylamování části materiálu ostří. Oba znaky opotřebení patrně opět souvisí s pohybem kolíku skrz otvor. Z naměřených hodnot je opět prokazatelný významný nárust hodnoty rádiusu ostří, obdobný jako v případě přechozího hodnoceného nástroje. Je předpokládaná obdobná příčina vzniku adheze jako u spodní matrice. Po obvodu střižné hrany, stejně tak jako v jejím okolí, je opět viditelné poškození povlaku, ovšem ne v takové míře, jako v předchozím případě.

6.4 Zhodnocení vlivu výrobních technologií na životnost výrobních nástrojů

U plně otestovaného páru matric vyrobených konvenční metodou byla změřena jejich životnost v množství 27 000 kusů vyrobených zploštění. U páru matric bývá, dle zkušeností z výrobního provozu, průměrně dosahováno životnosti v rozmezí 40 000 – 50 000 kusů zploštění. Během testování matric bylo dosaženo téměř poloviční hodnoty životnosti. I přes tuto skutečnost byly nástroje, zejména spodní matrice, považovány z hlediska počtu vyrobených kusů za úspěšné. Z tohoto hodnocení je patrné, že rozsah životnosti, ve kterém se tyto nástroje běžně pohybují, je poměrně široký. Zároveň bylo konstatováno, že nástroj bylo nutné vyřadit z provozu kvůli zhoršení funkce horní tvářecí plochy, kde bylo patrné poškození tenké vrstvy.

Na základě těchto skutečností se tedy nabízí otázka, jaký smysl vůbec má zkoumání vlivu technologie výroby, která byla nasazena v průběhu hrubovacího úseku frézovací operace. Vliv na výslednou kvalitu obráběných ploch má v obecnosti zejména poslední dokončovací operace výroby. Vzhledem k rozsahu průměrného vyráběného množství zploštění jedním nástrojem je pro dosažení znatelného zlepšení životnosti nutná úprava, která pokaždé zajistí skokové, například 2násobné zvýšení počtu vyrobených kusů. Změnou technologie hrubování nebylo očekávané tak výrazné zlepšení produktivity na straně vyráběného nástroje. Význam nasazení rozdílných technologií výroby ve výsledku zůstává především ve srovnání jejich ekonomické výhodnosti, která bude vyhodnocena v závěru práce. Pro zlepšení životnosti výrobních nástrojů má smysl zabývat se technologiemi výroby, které mají vliv na výslednou kvalitu opracovaného povrchu. Případně je vhodné zabývat se konstrukčními změnami nástrojů, které by mohly mít citelný dopad na charakter výrobního procesu.

6.5 Návrhy zvýšení životnosti nástrojů

Testování nástrojů proběhlo za účelem měření jejich životnosti, která odpovídala počtu vyrobených kusů zploštění. Testování bylo zaměřeno zejména na nástroj spodní matrice. V průběhu testování bylo sledováno opotřebení nástrojů, zejména jejich střižných hran, opět s větší pozorností na spodní matrici a konkrétně na střižnou hranu vnitřního otvoru Ø 11,9 H7 / Ø 14 mm. Z pozorování nástroje bylo možné rozpoznat charakter různých opotřebení, na základě čehož byly určeny možné příčiny jeho poškození, které vedly po 27 000 kusech vyrobených zploštění k ukončení testování a vyřazení nástroje z provozu. Na základě určených příčin opotřebení nástroje je možné navrhnout úpravy, kterými by bylo do budoucna možné intenzitu opotřebení zmírnit.

6.5.1 Změna intenzity chlazení střižné hrany

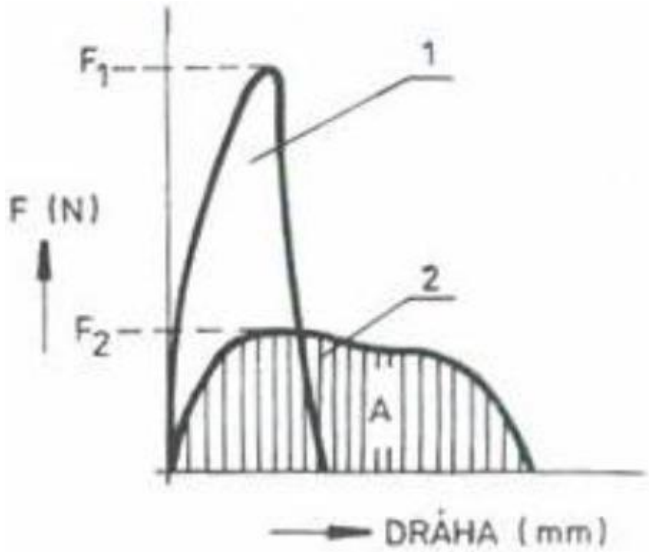
U vnitřního střižného otvoru spodní matrice byla pozorována rozsáhlá tvorba a šíření trhlin včetně vylomování částí materiálu ostří. Tvorba trhlin, jak již bylo zmíněno, je spojována mimo jiné i s teplotními rázy. U obdobné varianty testovaného nástroje byla v minulosti zkoumána možnost zvýšení životnosti zavedením vodního chlazení vnitřními kanálky nástroje. Tato úprava se projevila příznivě skokovým, téměř trojnásobným zvýšením životnosti nástroje. V průběhu současného testování bylo, směrem k vnitřní střižné hraně otvoru, přivedeno další chladící médium v podobě proudu stlačeného vzduchu. Je tedy možné se domnívat, že bylo zvolené nesprávné chlazení, respektive jeho intenzita. V případě vzniku tepelných trhlin je obecně doporučeno zvýšení nebo celkové omezení přívodu chladícího média. U testovaného nástroje by bylo možným řešením celkové omezení přístupu proudu vzduchu ke střižné hraně otvoru.

Trhliny a vylamování materiálu ostří mohou mít zároveň souvislost s přerušovaným řezem. Střižné hrany obecně jsou u testovaných nástrojů namáhány cyklicky vzhledem k charakteru výrobního procesu zploštění, do kterého nelze zasahovat. Je možné se ale zaměřit na nástroj, který u vnitřní střižné hrany periodicky se opakující namáhání vyvolává. Jedná se o kolík, který vtlačuje odebíraný materiál proti střižnému otvoru spodní matrice.

6.5.2 Změna konstrukce střižníku

Současný stav střižného procesu lze charakterizovat jako střih rovnoběžnými noži. Dochází při něm ke stříhání materiálu najednou v celé šířce, což má za následek rychlý nárůst a následný pokles střižné síly. Střižná síla prudce stoupá po dosednutí nože na materiál a v okamžiku tvorby trhlin v blízkosti řezných hran nože dosahuje maxima. Při přetržení materiálu síla prudce klesá. Takovýto průběh střižné síly není, z hlediska vznikajících rázů, příznivý. [4]

Průběh střižné síly lze změnit konstrukční úpravou střižné hrany „zešikmením/skloněním“ nože pod určitým úhlem. Stříhaný materiál je po své šířce odebírán postupně, ne najednou. Výsledná střižná síla je tak, oproti střihu rovnoběžnými noži, menší, její průběh rovnoměrnější a v průběhu střižného procesu tak nedochází ke značným rázům. Srovnání průběhu střižné síly při stříhání rovnoběžnými (1) a skloněnými (2) noži znázorňuje graf níže, viz. Obrázek 65. [6]



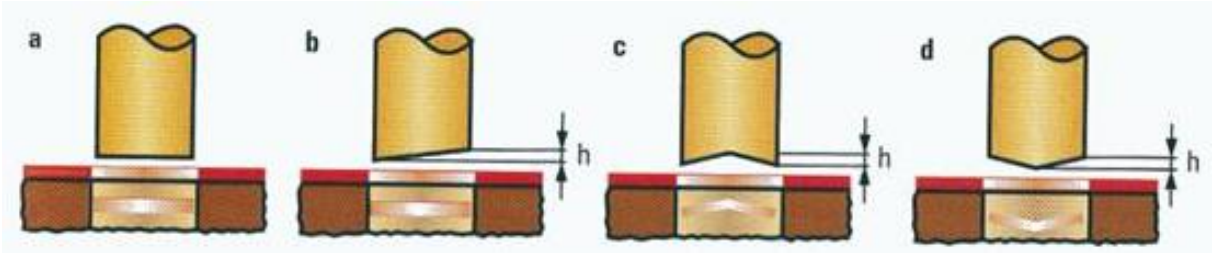
Obrázek 65: Porovnání průběhu střižné síly a velikosti práce [6]

Pro výpočet velikosti střižné síly při střihu skloněnými noži lze využít vztah:

$$F_{skl} = (0{,}16 \div 0{,}50) \cdot \frac{s^2 \cdot R_{ms}}{tg\lambda} \quad (4)$$

kde s - tloušťka stříhaného materiálu (mm),
R_{ms} - pevnost ve střihu (MPa),
λ - úhel sklonu nože (5 – 8° pro tloušťky >3 mm). [6]

Zařízení používané ke stříhání, tzv. střihadlo, se skládá z pohyblivé části upnuté do beranu lisu (střižník), a z pevné části upnuté na stole lisu (střižnice). Dle potřeby regulace velikosti a průběhu střižné síly je možné upravit konstrukci nástrojů, viz. Obrázek 66. [6]



Obrázek 66: Úprava konstrukce střižníku [5]

Dle způsobu „zešikmení“ střižné hrany je možné rozlišit několik variant konstrukce. Jednostranné zešikmení (b) se doporučuje pouze pro nastřihování. Oboustranné zešikmení (c, d) pak na střižníku vyrovnává působící síly a nevychyluje jej z osy. Hrana střižnice zůstává ve všech popsaných případech rovná. [5]

V případě testovaných nástrojů je možné za střižník považovat nástroj střižný kolík a za střižnici nástroj spodní matrice. V průběhu výroby zploštění se kolík pomocí vedení lisu periodicky pohybuje vůči matricím a vnitřní střižný otvor, zejména spodní matrice, cyklicky zatěžuje vtlačováním stříhaného materiálu. Nabízí se tedy konstrukční úprava kolíku pro zmenšení velikosti a zmírnění průběhu střižné síly, a tedy zároveň zmírnění rázů od přerušovaného řezu. V současnosti je kolík zkonstruován s plochým čelem, které má po svém obvodě předepsanou ostrou hranu. Jako alternativa se nabízí úprava oboustranným zkosením pod úhlem sklonu nože 5°. Vliv na velikost výsledné střižné síly je možné potvrdit výpočtem. Pro současný stav bez konstrukční úpravy platí:

Délka střihu pro střižnou hranu Ø 11,9 mm:

$$L = 2 \cdot \pi \cdot r \tag{5}$$

$$L = 2 \cdot \pi \cdot 5{,}95$$

$$L = 37{,}4\ mm$$

Střižná plocha při tloušťce střiženého materiálu 4,5 mm:

$$S = L \cdot s \tag{3}$$

$$S = 37{,}4 \cdot 4{,}5$$

$$S = 168{,}3\ mm^2$$

Pevnost ve střihu pro materiál 34MnB5:

$$R_{ms} = (0{,}75 \div 0{,}85) \cdot R_m \tag{2}$$

$$R_{ms} = 0{,}8 \cdot 650$$

$$R_{ms} = 520\ MPa$$

Maximální střižná síla:

$$F_{max} = S \cdot R_{ms} \cdot k \tag{4}$$

$$F_{max} = 168{,}3 \cdot 520 \cdot 1{,}3$$

$$\boldsymbol{F_{max} \cong 113\ 771\ N}$$

Pro alternativu s úhlem sklonu λ = 5°:

$$F_{skl} = (0{,}16 \div 0{,}50) \cdot \frac{s^2 \cdot R_{ms}}{tg\lambda} \tag{6}$$

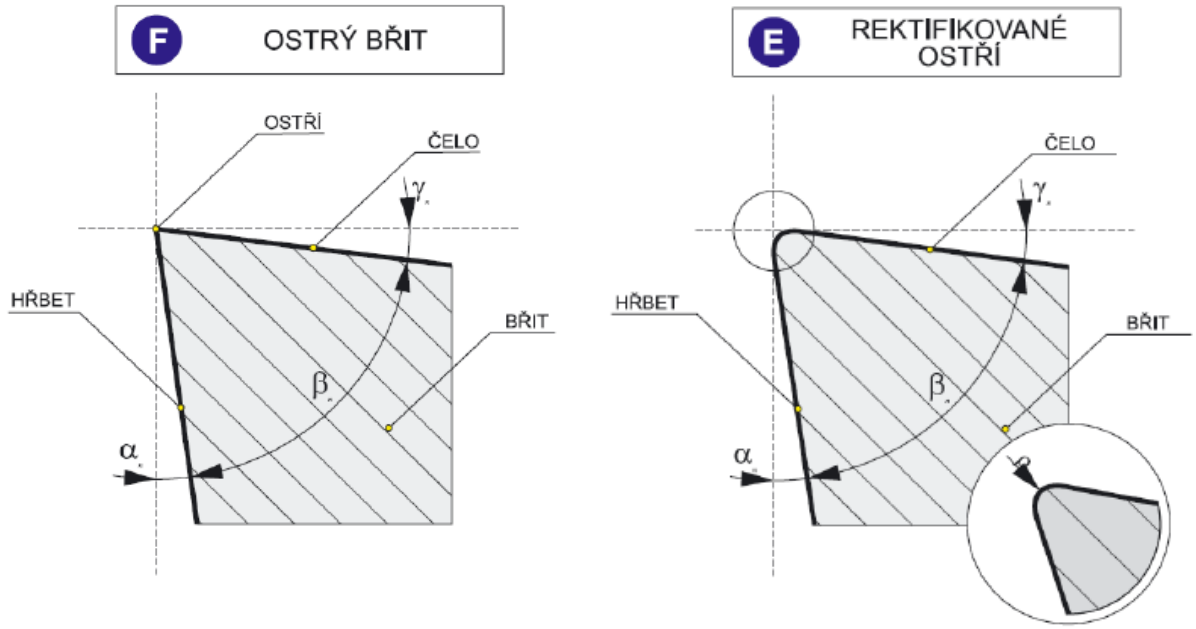
$$F_{skl} = 0{,}3 \cdot \frac{4{,}5^2 \cdot 520}{tg5°}$$

$$\boldsymbol{F_{skl} \cong 36\ 108\ N}$$

Z výpočtů je patrné, že střižná síla při použití oboustranného zkosení pod úhlem 5° dosahuje třetinové hodnoty maximální střižné síly rovnoběžnými noži.

6.5.3 Změna mikrogeometrie břitu

Na testovaných nástrojích bylo sledováno poškození tenké vrstvy CrAlSiN, jejíž absence přispěla k urychlení nástrojů, zejména spodní matrice. Před začátkem testování byly na střižných hranách matric z hlediska mikrogeometrie břitu pozorovány nedostatky po dokončovacích operacích výroby. Na svrchní funkční ploše v okolí střižných hran bylo taktéž možné sledovat stopy po předchozím obrábění nástrojů. Pro správnou funkci tenké vrstvy je nejvýznamnějším parametrem její adheze k substrátu neboli základnímu materiálu. Při nedostatečné adhezi však již od počátku zatížení dochází k porušení systému substrát – tenká vrstva. Z tohoto důvodu je důležité dbát na přípravné fáze před samotnou depozicí tenké vrstvy. Podstatná je celková jakost ošetřovaného povrchu vyjádřená jeho drsností. Z hlediska řezného nástroje je pak významná mikrogeometrie břitu. Konkrétně se jedná o nerovnosti v řádech mikrometrů vyskytující se na řezném břitu po broušení. Následkem broušení zároveň vzniká na břitu ostrá hrana, která je nežádaná vzhledem k nízké odolnosti proti mechanickému porušení. Vlivem ostré hrany pak dochází i k odlupování tenké vrstvy. Z těchto důvodů se před samotnou depozicí zavádí úpravy břitu neboli rektifikace (korektura), kterou dojde k odstranění nerovností, drsnosti ploch v okolí ostří a zaoblení řezné hrany, viz. Obrázek 67. [37]



Obrázek 67: Úprava řezné hrany [38]

Mezi metody úpravy břitu patří např. pískování, kartáčování, lapování, omílání a další. Na výslednou jakost upraveného břitu má vliv i způsob rektifikace, kdy nesprávně zvolená doba úpravy břitu, např. omíláním, má následně vliv na trvanlivost deponovaného nástroje. [39]

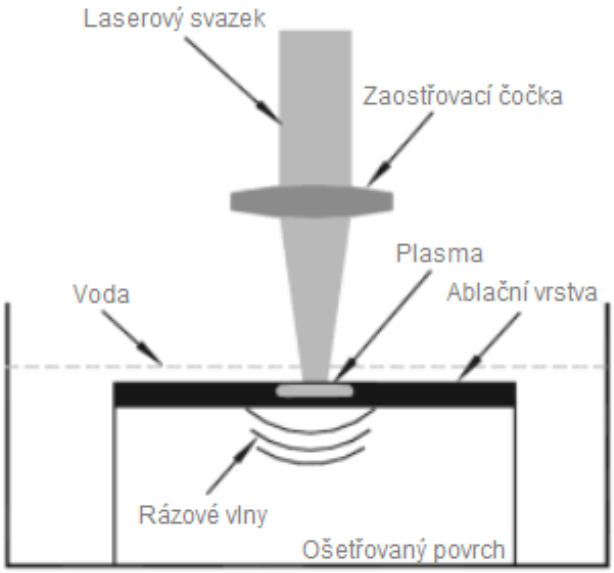
Na základě sledovaného poškození tenké vrstvy testovaných nástrojů se nabízí věnovat větší pozornost finálním úpravám nástrojů. Zejména dodržení výrobního postupu a předepsaných hodnot drsností na funkčních plochách nástrojů a také, např. pomocí mokrého pískování, dosáhnout zaoblení rádiusu ostří v rozmezí 10 – 15 µm po celé délce ostří. Tyto úpravy jsou podstatné nejen pro zajištění správné funkce tenké vrstvy, ale jsou zároveň i podmínkou pro aplikaci technologie Laser Shock Peening (LSP) představené v následující podkapitole.

6.5.4 Laser Shock Peening

Laser shock peening (LSP) je technika povrchové úpravy, jejíž aplikací úspěšně dochází ke zvýšení únavové pevnosti kovových součástí. Charakteristickým znakem LSP je přítomnost tlakových zbytkových napětí pod ošetřeným povrchem. Ty vznikají mechanicky v důsledku velkých rázových vln vyvolaných za pomocí vysokoenergetického laserového pulsu. Díky přítomnosti tlakových zbytkových napětí v materiálu lze výrazně zvýšit jeho únavovou pevnost zesílením tenkých oblastí součásti a zároveň lze omezit tvorbu a šíření povrchových trhlin. Působením rázové vlny dále dochází ke zvýšení tvrdosti a meze kluzu materiálu. [40]

LSP lze využít k ošetření kovových součástí rozličných druhů materiálů, jako jsou litina, slitiny hliníku, titanu, superslitiny na bázi niklu a další. Proces nachází velké využití v leteckém průmyslu, kde se s jeho pomocí ošetřují lopatky turbíny, rotor vrtulníku a jeho komponenty a další součásti, kde je klíčová ochrana proti poškození cizími předměty, nebo u součástí, kde existuje riziko vzniku trhlin nerozeznatelných běžnou inspekcí. Jedinečnou výhodou procesu LSP je možnost regulace a ovládání laserového pulsu v čase. Pro každý proces aplikace LSP je možné pomocí počítačově řízeného systému měřit a zaznamenávat energii jednotlivého laserového pulsu. LSP je zároveň možné aplikovat opakovaně na stejném místě součásti. V neposlední řadě lze pomocí LSP ošetřit těžko dostupné oblasti, nepřístupné konvenčním kuličkováním. [40]

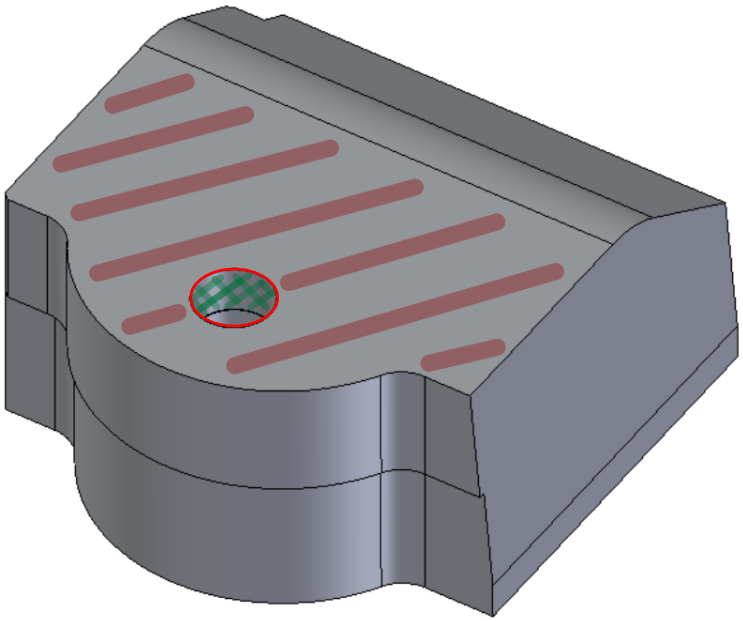
Tradiční kuličkování využívá rozměrově velmi malých kovových či keramických kuličkových tělísek k vytvoření malých důlků v důsledku jejich dopadu na ošetřovaný povrch. Pod důlkem tak může vzniknout koncentrovaný objem vysoce stlačeného materiálu. Rovnoměrná vrstva takovýchto důlků může odolávat tvorbě a šíření trhlin, zároveň také i korozi. Tato tradiční metoda má navzdory svému jednoduchému použití i svá omezení. Zaprvé není možné zaručit rovnoměrnou míru zbytkových tlakových napětí po celé ošetřované ploše. Potom samotná hloubka působení vzniklého napětí je omezena u měkkých kovových materiálů (slitiny hliníku) na hodnotu kolem 0,25 mm, u tvrdších materiálů zpravidla do hloubky ještě nižší. V neposlední řadě může být po aplikaci procesu povrch zdrsněný, což vyžaduje další úpravu. Proces LSP tyto nedostatky dokáže eliminovat. Zbytková tlaková napětí mohou dosáhnout hloubky větší než 1 mm pod ošetřovaným povrchem, který zároveň po aplikaci procesu není poškozen a celá součást neztrácí na rozměrové přesnosti. Schématické znázornění použití LSP je ilustrováno níže, viz. Obrázek 68. [40]



Obrázek 68: Schématická konfigurace LSP

Při intenzivním působení laserového svazku na kovový povrch po velmi krátký časový úsek (kolem 30 ns) dochází k jeho vypařování při teplotách dosahujících v maximu 10 000 °C. Následnou ionizací dochází ke vzniku plazmatu. Plazma nadále vstřebává energii laserového svazku až do ukončení depozice. Skrze rázové vlny je do materiálu přenášeno tlakové napětí vytvořené působením plazmy. Při vzájemném působení plazmy s ošetřovaným povrchem je dosahováno tlaku v řádech desetin GPa, pokud ošetřovaný povrch není opatřen ablační vrstvou. V opačném případě je kovový povrch opatřen ablační vrstvou neprůhledného materiálu, jako černá barva nebo hliníková folie, a proti průchodu laserového svazku dále působí procesní médium typu destilovaná voda nebo vrstva skla. V této konfiguraci je na povrchu kovového materiálu působením plazmy dosahováno vysokých hodnot tlaku v rozmezí 5-10 GPa. Silnější tlakové rázy mohou zvýšit účinnost LSP dosažením vysokých hodnot zbytkového tlakového napětí působícího do větší hloubky. [40]

U testovaných nástrojů, zejména spodní matrice, je možné kombinací LSP a tenké vrstvy deponované na laserem ošetřený povrch dosáhnout skokového zvýšení životnosti nástroje. V rámci zlepšení životnosti nástrojů vlivem technologie výroby byl navázán kontakt se společností, ve které byly testované nástroje deponovány tenkou vrstvou, a která je zároveň schopná nabídnout ošetření povrchu nástrojů technologií LSP. Po konzultaci s odborníky z této společnosti je na základě zkušeností teoreticky možné dosáhnout až 2,5násobného zvýšení životnosti nástroje. Podmínkou aplikace LSP je, kvůli vysokému tlakovému působení na materiál, dostatečně ošetřená mikrogeometrie břitu, viz. předchozí podkapitola. Po zaoblení ostří střižných hran by byly pro co nejlepší účinek ošetřeny pomocí LSP plochy matrice po obou stranách vnitřní střižné hrany, tedy svrchní tvářecí plocha a plocha vnitřního střižného otvoru, viz. Obrázek 69. Následně by na nástroj byla deponována tenká vrstva. Touto technologickou úpravou bude zároveň docíleno původní myšlenky zadání, kdy působením tohoto technologického procesu dojde ke vzniku tlakových zbytkových napětí v povrchové vrstvě materiálu, které jsou obecně považovány za prospěšné, pro již výše zmíněné důvody. Očekává se tedy pozitivní vliv na životnost výrobních nástrojů.



Obrázek 69: Návrh ošetření spodní matrice pomocí LSP

7 Technicko – ekonomické zhodnocení

V kapitole bude provedeno technicko-ekonomické zhodnocení použitých technologií obrábění při výrobě nástrojů střižný nůž, spodní matrice a svrchní matrice. Zhodnocení bude zaměřeno na srovnání strojních časů dosažených při operaci frézování použitím rozlišných metod výroby a srovnání z hlediska výrobních nákladů na operaci frézování. Jelikož bylo součástí zadání i testování vyrobených nástrojů, na základě kterého vznikly návrhy zvýšení životnosti, bude provedeno i technicko-ekonomické zhodnocení realizovaného návrhu.

7.1 Zhodnocení výrobních technologií

První částí zadání byla výroba nástrojů, v průběhu které byly v rámci operace frézování nasazeny rozdílné technologie výroby. Největší dopad srovnávaných technologií výroby se projevil ve strojním čase frézování. V následujícím srovnání výrobních technologií při výrobě střižného nože, viz. Tabulka 18, jsou zaznamenány strojní časy dosažené při frézování jednoho kusu. Vynásobením strojních časů strojní hodinovou sazbou byly vypočteny výrobní náklady na operaci frézování. Ve strojní hodinové sazbě jsou již, kromě nákladů stroje, zahrnuty i ostatní mzdové, odbytové a režijní položky nákladů.

Tabulka 18: Střižný nůž - srovnání nasazených technologií frézování

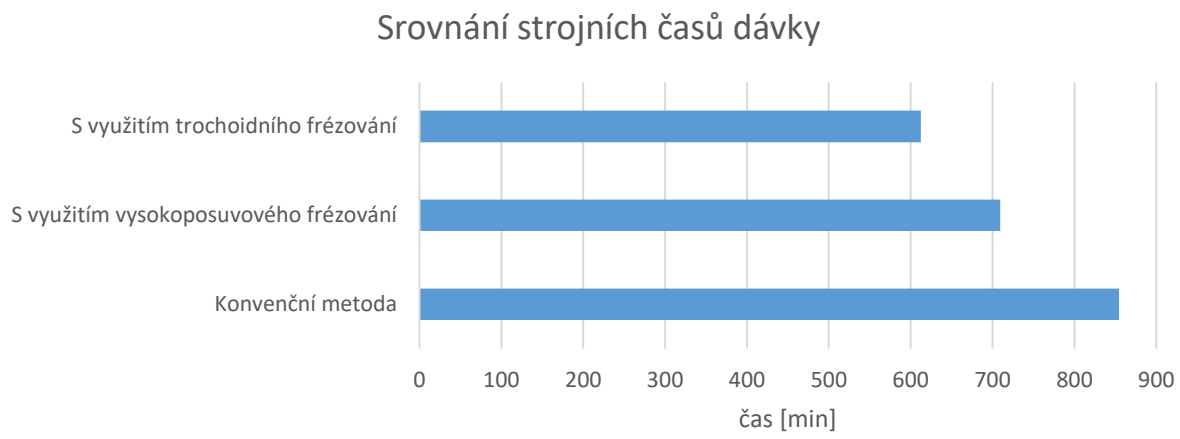
Výrobní technologie	Jednotkový strojní čas [min/ks]	Strojní hodinová sazba [Kč/hod]	Výrobní náklady frézování [Kč/ks]
Konvenční	28,49	1 200	570
Vysokoposuvové frézování	23,65	1 200	473
Trochoidní frézování	20,42	1 200	408

Na základě srovnání z hlediska strojního času a výrobních nákladů se jako nejvýhodnější přístup k frézování jeví použití metody s využitím trochoidního frézování. Naproti tomu nejméně příznivá z hlediska ceny a času je konvenční metoda s využitím rohového frézování. V následující tabulce, Tabulka 19, je uvedeno srovnání strojních časů frézování a výrobních nákladů operace frézování konvenční metodou a metodou s využitím trochoidního frézování pro 1 kus a výrobní dávku 30 kusů. Grafické srovnání nasazených technologií ukazuje Obrázek 70.

Tabulka 19: Střižný nůž - úspora

	Konvenční	Trochoidní	Úspora	Procentuální vyjádření
Výrobní náklady 1ks [Kč]	570	408	+ 162 Kč	28 %
Výrobní náklady 30 ks [Kč]	17 100	12 240	+ 4 860 Kč	
Strojní čas 1ks [min]	28,49	20,42	+ 8,07 min	
Strojní čas 30 ks [min]	854,7	612,6	+ 242,1 min	

Nasazením technologie trochoidního frézování došlo na výrobní dávce 30 kusů k úspoře výrobních nákladů 4 860 Kč a strojního času operace frézování 242,1 min.



Obrázek 70: Střižný nůž - graf srovnání strojních časů dávky

Obdobným způsobem lze srovnat nasazení technologií výroby i u zbylých nástrojů, tj. spodní a svrchní matrice. Srovnání bude opět provedeno z hlediska strojního času a výrobních nákladů na operaci, viz. Tabulka 20. U nejvíce a nejméně výhodné výrobní varianty bude opět proveden výpočet úspory při výrobě 1 kusu a výrobní dávky 30 ks, viz.

Tabulka 21.

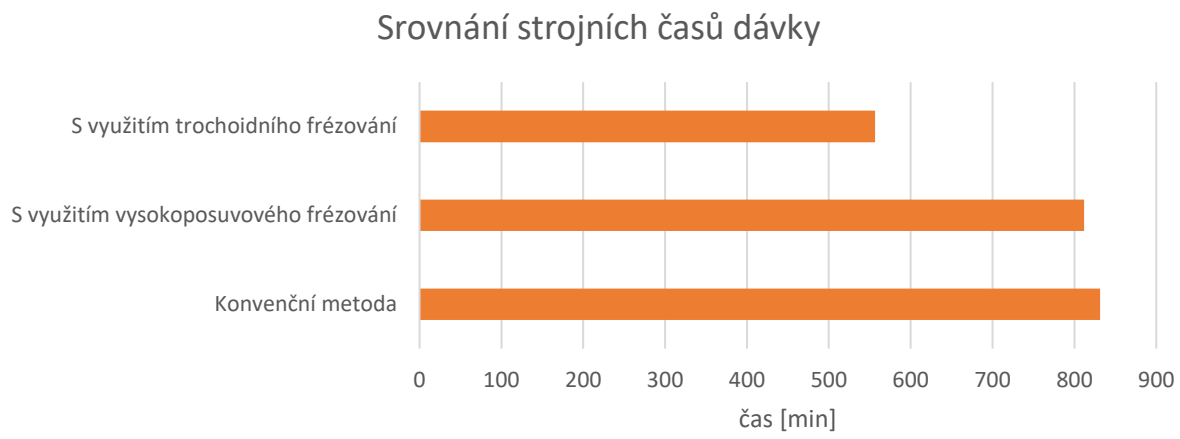
Tabulka 20: Spodní matrice - srovnání nasazených technologií frézování

Výrobní technologie	Jednotkový strojní čas [min/ks]	Strojní hodinová sazba [Kč/hod]	Výrobní náklady frézování [Kč/ks]
Konvenční	27,71	1 200	554
Vysokoposuvové frézování	27,06	1 200	541
Trochoidní frézování	18,55	1 200	371

Tabulka 21: Spodní matrice - úspora

	Konvenční	Trochoidní	Úspora	Procentuální vyjádření
Výrobní náklady 1ks [Kč]	554	371	+ 183 Kč	33 %
Výrobní náklady 30 ks [Kč]	16 620	11 130	+ 5 490 Kč	
Strojní čas 1ks [min]	27,71	18,55	+ 9,16 min	
Strojní čas 30 ks [min]	831,3	556,5	+ 274,8 min	

U výroby spodní matrice se jako nejvýhodnější jeví opět metoda výroby s využitím trochoidního frézování. Úspora z hlediska výrobních nákladů dávky 30 kusů činí 5 490 Kč, u strojního času došlo k úspoře 274,8 min. Ze srovnání technologií je patrné, že nasazením vysokoposuvového frézování nedošlo oproti konvenční metodě k výraznému snížení strojního času a tím pádem i výrobních nákladů, viz. Obrázek 71.



Obrázek 71: Spodní matrice - graf srovnání strojních časů dávky

Posledním vyráběným nástrojem hodnoceným z technicko-ekonomického hlediska je svrchní matrice.

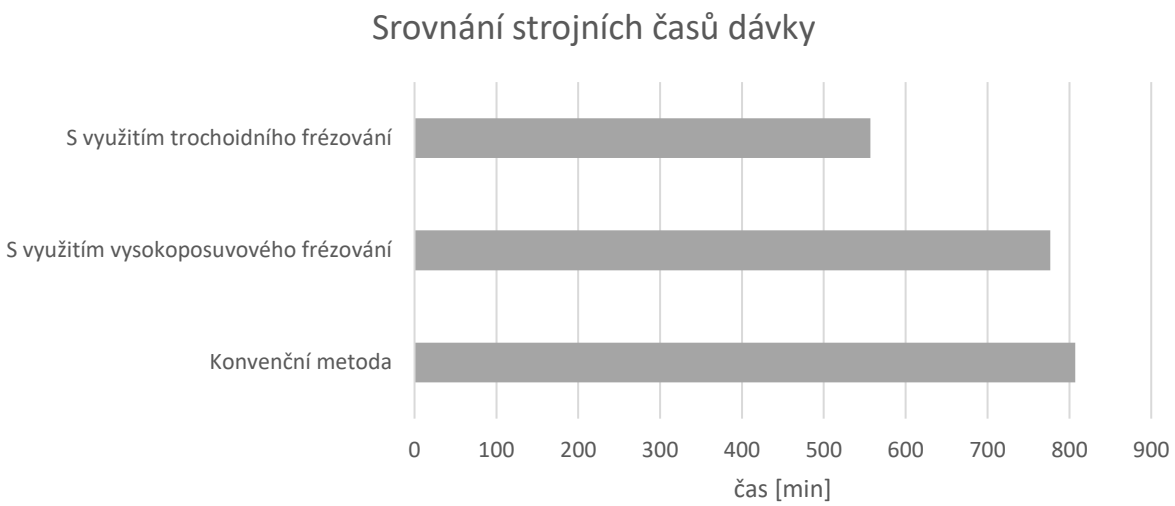
Tabulka 22: Svrchní matrice - srovnání nasazených technologií frézování

Výrobní technologie	Jednotkový strojní čas [min/ks]	Strojní hodinová sazba [Kč/hod]	Výrobní náklady frézování [Kč/ks]
Konvenční	26,9	1 200	538
Vysokoposuvové frézování	25,89	1 200	518
Trochoidní frézování	18,57	1 200	371

Tabulka 23: Svrchní matrice - úspora

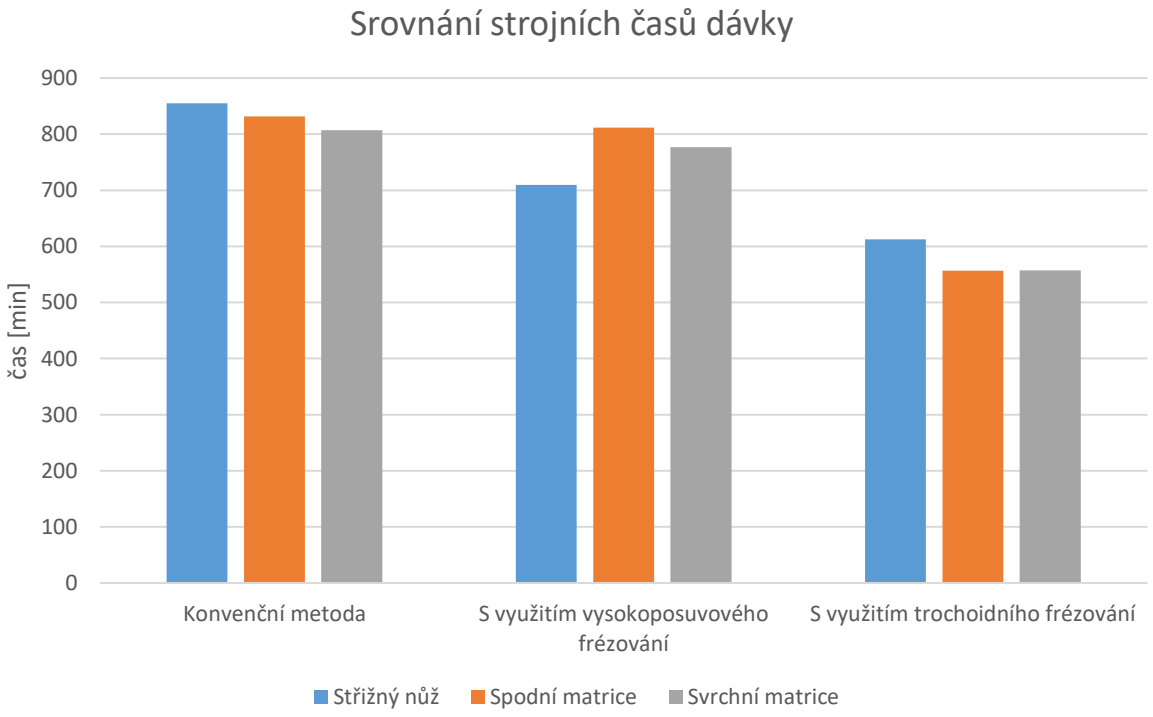
	Konvenční	Trochoidní	Úspora	Procentuální vyjádření
Výrobní náklady 1ks [Kč]	538	371	+ 167 Kč	31 %
Výrobní náklady 30 ks [Kč]	16 140	11 130	+ 5 010 Kč	
Strojní čas 1ks [min]	26,9	18,57	+ 8,33 min	
Strojní čas 30 ks [min]	807	557,1	+ 249,9 min	

Vzhledem k velké podobnosti nástrojů spodní a svrchní matrice byly i hodnoty strojních časů velmi podobné. Úspora ve výrobních nákladech dávky činí 5 010 Kč, u strojního času dávky 249,9 min. Na základě srovnání použitých metod výroby došlo k největší úspoře strojního času při nasazení technologie trochoidního frézování, viz. Obrázek 72. Z grafu srovnání strojních časů pro jednotlivé technologie je, vzhledem k velké podobnosti vyráběných nástrojů, viditelný obdobný průběh jako u hodnocení spodní matrice.



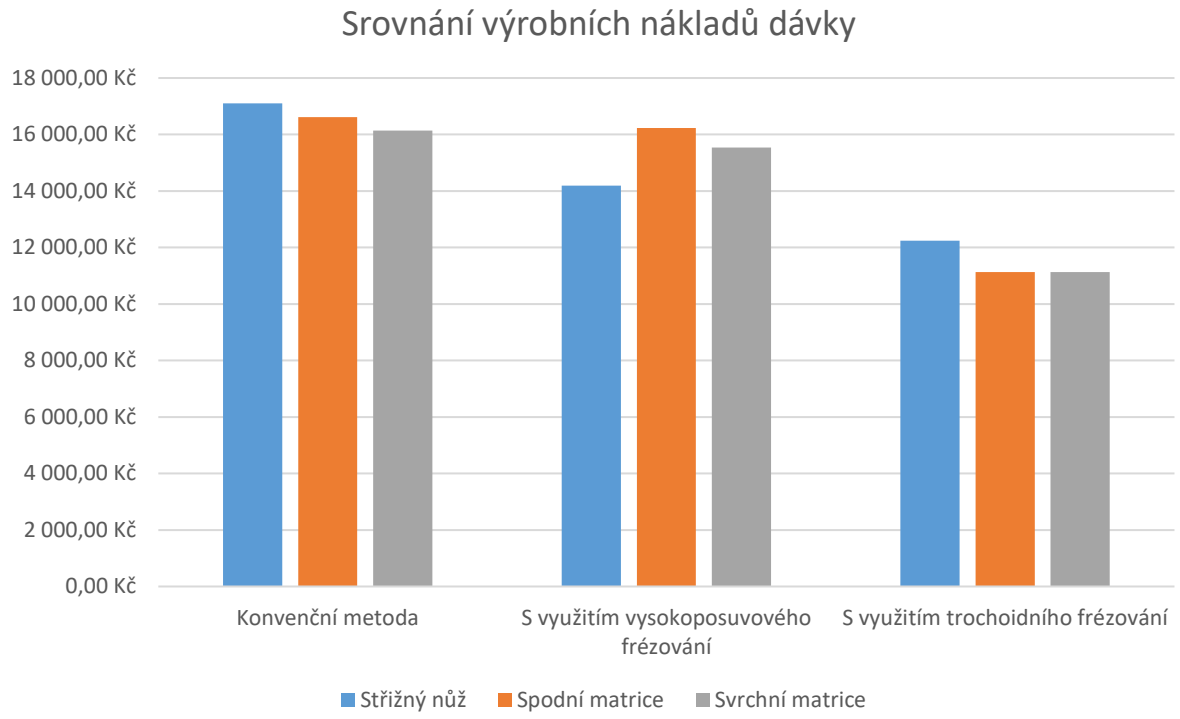
Obrázek 72: Svrchní matrice - graf srovnání strojních časů dávky

Pro lepší přehlednost provedených srovnání bylo vytvořeno společné shrnutí změřených strojních časů přepočtených na výrobní dávku 30 kusů, viz. Obrázek 73. Z grafu je patrné zlepšení při nasazení technologie trochoidního frézování u všech tří vyráběných součástí. Oproti konvenční metodě došlo na výrobní dávce 30 kusů nasazením trochoidního frézování ke snížení strojního času operace frézování o 242,1 min u střižného nože, 274,8 min u spodní matrice a 249,9 min u svrchní matrice. Nasazením vysokoposuvového frézování došlo k výraznějšímu snížení strojního času pouze při obrábění střižného nože, konkrétně o 145,2 min. U zbylých dvou vyráběných nástrojů, spodní a svrchní matrice, bylo snížení strojního času nepatrné, pouze v rozmezí 20 – 30 min.



Obrázek 73: Graf srovnání strojních časů dávky

Pro úplnost srovnání nasazených technologií obrábění je uveden graf srovnání výrobních nákladů napříč vyráběnými nástroji, viz. Obrázek 74. Vzhledem ke skutečnosti, že výroba všech součástí, včetně nasazení srovnávaných technologií, probíhala na stejném výrobním zařízení, byla pro výpočet výrobních nákladů použita jednotná strojní hodinová sazba ve výši 1 200 Kč/hod. Výsledný graf má tedy obdobný charakter jako v případě srovnání strojních časů. Největší peněžní úspora je opět v případě nasazení trochoidního frézování. Oproti konvenční metodě došlo na dávce 30 kusů k peněžní úspoře 4 860 Kč při výrobě střižného nože, 5 490 Kč při výrobě spodní matrice a 5 010 Kč u svrchní matrice. Technologií vysokoposuvového frézování bylo u vyráběných nástrojů docíleno opět nevýrazného snížení výrobních nákladů, zejména u páru matric, kde peněžní úspora vychází v rozmezí 400 – 600 Kč. Výraznější snížení výrobních nákladů nastalo pouze u střižného nože, kde úspora činí 2 910 Kč.



Obrázek 74: Graf srovnání výrobních nákladů dávky

Na základě provedeného srovnání je možné konstatovat, že z hlediska strojního času a výrobních nákladů je u frézování vyráběných součástí nejvýhodnější nasazení metody s využitím trochoidního obrábění. Výhodnost použití této technologie tkví především ve snížení strojního času, kde vychází napříč vyráběnými nástroji průměrná úspora 255 min na výrobní dávku 30 kusů. Z hlediska výrobních nákladů je při výrobní dávce 30 ks nasazením metody s využitím trochoidního frézování ušetřeno v průměru 5 120 Kč na vyráběný nástroj. Tato hodnota peněžní úspory nemusí být tak zajímavá vzhledem k ceně vyráběných dílů, která se pohybuje v rozmezí 60 000 – 140 000 Kč na výrobní dávku 30 kusů podle konkrétního vyráběného nástroje. Avšak v průměrné úspoře strojního času přes 4 hodiny na stejné výrobní dávce se nachází potenciál pro vyšší využití kapacity výrobního zařízení a tím pádem i možného vyššího zisku.

7.2 Zhodnocení použití povrchové úpravy LSP

U návrhu ošetření povrchu matric technologií Laser Shock Peening (LSP) bylo rozhodnuto pro jeho realizaci. Jelikož samotné testování je záležitostí delšího časového rozmezí a nebylo jej možné provést v rámci řešení této práce, bude provedeno technicko-ekonomické zhodnocení na základě předpokladů zvýšení životnosti nástroje, která se opírají o data již proběhlých testování obdobně ošetřených nástrojů.

Dle zkušeností je ošetřením povrchu nástroje kombinací LSP a tenké vrstvy možné dosáhnout až 2,5násobné zvýšení životnosti nástroje oproti původnímu stavu. Pro hodnocení případného přínosu této úpravy bude uvažováno méně optimistické zvýšení životnosti nástroje o 75 %.

Tabulka 24: Úspora výrobních nákladů vlivem LSP

Výrobní náklady spodní matrice	
Současný stav	3 130 Kč
Po ošetření povrchu pomocí LSP	3 900 Kč
Úspora výrobních nákladů na nástroj při zvýšení životnosti nástroje o 75 %	
1 nástroj	1 577,5 Kč
30 nástrojů	47 325 Kč

Ošetřením ploch spodní matrice pomocí LSP a následnou deponací tenké vrstvy bude odhadovaná cena nástroje činit 3 900 Kč za jeden kus. Na základě dat z výrobního provozu je u současně používaných matric ošetřených pouze tenkou vrstvou možné stanovit jejich průměrnou životnost na hodnotu 38 000 kusů vyrobených zploštění. Při uvažovaném zlepšení životnosti o 75 % dosáhne životnost nástroje 66 500 kusů vyrobených zploštění. Na jeden nástroj ošetřený pomocí LSP tak připadnou téměř dva nástroje bez této úpravy. Na stejný počet vyrobených zploštění tak bude použito menší množství nástrojů, což u výrobní dávky 30 kusů spodních matric bude znamenat úsporu 47 325 Kč, více jak polovinu výrobních nákladů na dávku 30 ks spodních matric bez ošetření LSP.

Při uvažovaném dosažení 2,5násobného zvýšení životnosti nástroje připadne při stejném objemu výroby na jeden nástroj ošetřený LSP dva a půl nástroje bez této úpravy. Peněžní úspora na 30 kusů vyrobených nástrojů bude činit 117 750 Kč, což překračuje výrobní náklady na 30 kusů nástrojů bez povrchové úpravy pomocí LSP. Nástroj by při tomto 2,5násobném zlepšení dosáhl životnosti 95 000 kusů vyrobených zploštění.

V obou případech, ať už méně či více znatelného zlepšení, dojde ke skokovému zvýšení životnosti nástrojů a zároveň i znatelné úspoře výrobních nákladů nástrojů.

8 Závěr

Původní motivací pro řešení této diplomové práce bylo zhodnocení vlivu výrobní technologie na životnost vybraných výrobních nástrojů. Úkolem bylo nasadit v průběhu výrobního procesu frézování technologie vysokoposuvového frézování, trochoidního frézování a rohového frézování. Postupným nasazením těchto metod obrábění byly vyrobeny nástroje, které byly následně testovány ve výrobním provozu. Jednalo se o nástroje Spodní matrice, Svrchní matrice a Střižný nůž sloužící k výrobě požadovaného tvaru konce torzní tyče, která je součástí celku stabilizačního systému. Vyráběný tvar byl pro jednoduchost nazýván jako „zploštění“. Výroba zploštění probíhala tvářením a stříháním prvků do podoby výsledného zploštění. Testování proběhlo za účelem měření životnosti nástrojů, které odpovídalo počtu vyrobených kusů zploštění.

Nástroje byly vyrobeny za použití zmíněných technologií frézování nasazených v úseku hrubování. Poté byly nástroje nasazeny do výrobního provozu, kde v rámci výroby zploštění proběhlo testování životnosti. V průběhu testování bylo zároveň průběžně sledováno a hodnoceno opotřebení nástrojů. Vyšší pozornost byla věnována nástroji Spodní matrice z důvodu obecně největšího opotřebení tohoto nástroje při výrobě zploštění. Sledování průběhu opotřebení bylo pak zvlášť zaměřeno na střižnou hranu vnitřního otvoru nástroje. Během testování byl vzhledem ke vzniklým komplikacím ve výrobním provozu a časovým důvodům otestován jeden pár matric, tedy svrchní a spodní matrice, vyrobené konvenční metodou s využitím rohového frézování. Životnost střižného nože nebylo možné změřit v časovém horizontu testování. Naměřená životnost spodní a resp. i svrchní matrice byla 27 000 kusů vyrobených zploštění. Sledované opotřebení spodní matrice vykázalo charakter poškození střižné hrany formou abrazního otěru, trhlin vzniklých po délce ostří vnitřní střižné hrany, vylamování částic ostří a poškození tenké vrstvy po plochách břitu a jeho okolí. Vzhledem k sledovanému poškození nástroje a obecně širokému rozmezí životnosti těchto nástrojů byl učiněn závěr, že vliv použitých výrobních technologií v rámci hrubovacího úseku operace frézování nemá tak zásadní vliv na výslednou životnost nástroje, jako finální operace výroby. Z tohoto důvodu byl význam nasazených technologií obrábění v rámci výroby nástrojů přeorientován směrem k zhodnocení ekonomické výhodnosti těchto technologií. Srovnáním strojních časů a výrobních nákladů jednotlivých operací frézování pro každý vyráběný díl byl učiněn závěr, že z obou hledisek vychází pro každý vyráběný nástroj jako nejvýhodnější nasazení technologie trochoidního frézování.

Pro další zvýšení životnosti testovaných nástrojů byla pozornost přesunuta směrem ke snížení vlivu příčin sledovaného poškození nástrojů, zejména u spodní matrice. Na základě sledovaného opotřebení nástrojů byly vytvořeny následující návrhy pro další zvýšení životnosti. V souvislosti s trhlinami a vylamováním částic ostří byla navržena změna intenzity chlazení břitu pro případnou eliminaci tepelných šoků. U nástroje Střižný kolík, který původně nebyl předmětem testování, byl vytvořen návrh na jeho konstrukční úpravu. V případě poškození tenké vrstvy byla doporučena předdepoziční úprava ošetřovaného povrchu se zaměřením na jeho drsnost po obrábění a mikrogeometrii střižných hran. Pro další skokové zvýšení životnosti nástrojů byla navržena úprava ošetřením povrchu nástroje pomocí technologie Laser Shock Peening (LSP), u které bylo rozhodnuto pro její budoucí realizaci.

Seznam použitých zdrojů

[1] MotoFocus.cz, „Stabilizátor – podceňovaná součástka,“ 7. Červen 2021. [Online]. Available: https://motofocus.cz/vyrobci/67660,stabilizator-podcenovana-soucastka. [Přístup získán 27. Duben 2022].

[2] HARDRACE, „REAR SWAY BAR - Q0346 | HARDRACE GLOBAL,“ [Online]. Available: https://www.hardrace.com/Product_detail.asp?id=4311&Car_Make=2&Car_model=88&Car_Type=617&MainType=114. [Přístup získán 27. Duben 2022].

[3] V. Machek, „Bórové oceli - Oceli budoucnosti,“ engineering.sk, [Online]. Available: https://www.engineering.sk/clanky2/povrchove-upravy/5320-borove-oceli-oceli-budoucnosti. [Přístup získán 12. Květen 2022].

[4] F. Tatíček a T. Pilvousek, „Akademie tváření: Stříhání | MM Průmyslové spektrum,“ MM Průmyslové spektrum, 17. Květen 2010. [Online]. Available: https://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-strihani. [Přístup získán 13. Květen 2022].

[5] Katedra tváření kovů a plastů, Fakulta strojní, Technická univerzita Liberec, „Technologie plošného tváření - stříhání,“ [Online]. Available: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/06.htm. [Přístup získán 13. Květen 2022].

[6] R. Čada, „TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ A SLÉVÁNÍ – TEORETICKÝ ZÁKLAD,“ Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013. [Online]. Available: https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_004/Technologie%20tv%C3%A1%C5%99en%C3%AD%20a%20sl%C3%A9v%C3%A1n%C3%AD%20-%20Teoretick%C3%BD%20z%C3%A1klad/02%20Text%20pro%20e-learning/publikovat/kapitoly/4.%20PLO%C5%A0N%C3%89%20ST%C5%98%C3%8DH%C3%81N%C3%8D.pd. [Přístup získán 13. Květen 2022].

[7] SHM Šumperk, „Základní nabídka povlaků SHM | SHM,“ [Online]. Available: https://shm-cz.cz/zakladni-nabidka-povlaku-shm/. [Přístup získán 26. Duben 2022].

[8] G. Huixia a e. al., „Erosion behavior of CrN, CrAlN and CrAlN/CrN multilayer coatings,“ 28 Únor 2022. [Online]. Available: https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0257897222002055?token=B4BFC3B6DCB1FA01448F9D250E94AD102458E2284F1130A8831F8C0A1243EA3CBDC137A46F0A6D101DE55B3F5A9C5289&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220419082243. [Přístup získán 19 Duben 2022].

[9] P. Tomáš a C. Albano, „High-temperature tribological properties of CrAlN, CrAlSiN and AlCrSiN coatings,“ 7 Září 2011. [Online]. Available: https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0257897211008474?token=81E9A6E6CE54B6EAF7C2961941451A67E7B771CD92D2B8CE1F88E0F39C3849F2A9894FE5F4BF02BF57F87D5E9B47C488&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220419082923. [Přístup získán 19 Duben 2022].

[10] voestalpine BÖHLER Edelstahl GmbH & Co KG, „W360 ISOBLOC,“ 12. Únor 2021. [Online]. Available: https://www.bohler-edelstahl.com/en/products/w360-

isobloc/#:~:text=Hot%20work%20tool%20steel%20with,ESR%20%E2%80%93%20at%20a%20higher%20hardness.. [Přístup získán 6. Únor 2022].

[11] Dörrenberg Edelstahl GmbH, „Special Steel PMD23,“ [Online]. Available: https://www.doerrenberg.de/wp-content/uploads/2020/05/PMD23_en.pdf. [Přístup získán 18. Duben 2022].

[12] J. Vyšata, „Moderní technologie - MTC - část obrábění,“ Katedra technologie obrábění, FST, ZČU v Plzni, Plzeň.

[13] T. Skopeček, P. Hofmann a M. Švantner, „Zbytková pnutí při vysokorychlostním frézování,“ katedra technologie obrábění, FST, ZČU v Plzni; Nové Technologie - Výzkumné centrum, ZČU v Plzni, 2007. [Online]. Available: https://www.mmspektrum.com/clanek/zbytkova-pnuti-pri-vysokorychlostnim-frezovani. [Přístup získán 13 Duben 2022].

[14] J. Duplák, M. Hatala, D. Dupláková a J. Steranka, „Evaluation of Time Efficiency of High Feed Milling,“ *TEM Journal,* 2018.

[15] TUNGALOY CORPORATION, „HIGH-FEED MILLING | Tungaloy,“ [Online]. Available: https://tungaloy.com/highfeed/us/. [Přístup získán 2021].

[16] R. Keever, „The Secret Mechanics of High Feed End Mills - In The Loupe,“ Harvey Performance, LLC., 11. Prosinec 2020. [Online]. Available: https://www.harveyperformance.com/in-the-loupe/the-secret-mechanics-of-high-feed-end-mills/#comments. [Přístup získán 2. Leden 2022].

[17] A. Rooks, „Heady Times for High-Feed Milling,“ *AdvancedManufacturing.org,* pp. 47-52, 2017.

[18] J. Matějíček, „SECO – frézování vysokým posuvem a třída MS2050 – i vaše možnost úspěchu,“ 16 Listopad 2015. [Online]. Available: https://www.oneindustry.cz/obrabeni/seco-frezovani-vysokym-posuvem-a-trida-ms2050-i-vase-moznost-uspechu/. [Přístup získán 1 Leden 2021].

[19] Sandvik Coromant, „Slicing and trochoidal milling,“ [Online]. Available: https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/milling-holes-cavities-pockets/pages/slicing-trochoidal-milling.aspx. [Přístup získán 23. Leden 2022].

[20] Harvey Performance Company, „Introduction to High Efficiency Milling - In The Loupe,“ Harvey Performance Company, LLC, 11. Srpen 2017. [Online]. Available: https://www.harveyperformance.com/in-the-loupe/intro-high-efficiency-milling/. [Přístup získán 23. Leden 2022].

[21] G. Gómez, P. Fernandéz de Lucio, A. del Olmo, G. Martinez de Pissón, A. Jimeno, A. González a L. López de Lacalle, „Comparison between milling roughing operations in full slotting manufacturing: trochoidal, plunge and conventional milling,“ *9th Manufacturing Engineering Society International Conference (MESIC 2021),* pp. 2-5, 2021.

[22] Harvey Performance Company, „Intro to Trochoidal Milling - In The Loupe,“ 28. Červen 2017. [Online]. Available: https://www.harveyperformance.com/in-the-loupe/introduction-trochoidal-milling/. [Přístup získán 23. Leden 2022].

[23] T. Pyle, „How to Combat Chip Thinning," 13. Březen 2017. [Online]. Available: https://www.harveyperformance.com/in-the-loupe/combat-chip-thinning/. [Přístup získán 24. Leden 2022].

[24] Sandvik Coromant, „Shoulder milling," [Online]. Available: https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/pages/shoulder-milling.aspx. [Přístup získán 30. Leden 2022].

[25] J. Matějíček, „Je rohové frézování opravdu tak jednoduché?," 9. Květen 2018. [Online]. Available: https://www.mmspektrum.com/clanek/je-rohove-frezovani-opravdu-tak-jednoduche. [Přístup získán 2. Únor 2022].

[26] ALZMETALL Werkzeugmaschinenfabrik und Gießerei Friedrich GmbH & Co. KG, „GS 800 Machining Center," D-83350 Altenmarkt/Alz · Germany.

[27] BLOHM Maschinenbau GmbH, „Surface gridning machine REDLINE S," [Online]. Available: https://pdf.directindustry.com/pdf/blohm-maschinenbau/redline-s-eco-steuerung/32330-76085-_2.html. [Přístup získán 2 Duben 2022].

[28] GF Machining Solutions, „AgieCharmilles AC Progress VP3," [Online]. Available: https://www.marcusmachinery.com/products/gf-machining-solutions/category/24/product/54. [Přístup získán 2 Duben 2022].

[29] Carl Zeiss Unternehmensbereich Industrielle Meßtechnik, „ZEISS ScanMax," [Online]. Available: https://www.maschinen-kistner.de/files/Produkte/Diverse%20Maschinen/Zeiss-ScanMax/PDF_englisch/ZEISS_ScanMax._.pdf. [Přístup získán 4 Duben 2022].

[30] MITSUBISHI MATERIALS Corporation, „Mitsubishi Materials Web Catalogue," [Online]. Available: http://www.mitsubishicarbide.net/mhg/enuk/rotating_inserts/no_srs/20102755?tlng_sht_disp_flg=1. [Přístup získán 5. Květen 2022].

[31] Seco Tools GmbH, „LOHT060310TR-M07 MP2500 | Secotools.com," [Online]. Available: https://www.secotools.com/article/p_02828512. [Přístup získán 4. Květen 2022].

[32] Jansen Schneidwerkzeuge, „Werkzeugkatalog - Jansen," [Online]. Available: https://www.j-s-v.com/Downloads/JSV_BWZ_Katalog.pdf. [Přístup získán 4. Květen 2022].

[33] BO-IMPORT s.r.o, „Brusné kotouče," [Online]. Available: https://www.bo-import.cz/brusny-kotouc-t1-400x50x127mm-80a-54-i9-av217-p23-p58904/#gallery. [Přístup získán 5. Květen 2022].

[34] VSB - Technical University of Ostrava, „5. Měření opotřebení nástrojů," [Online]. Available: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_05.pdf. [Přístup získán 28. Duben 2022].

[35] J. Řehoř, „Teorie obrábění - Otupování břitu nástroje," Západočeská univerzita v Plzni, Katedra technologie obrábění, Plzeň, 2021.

[36] P. Švecová, „Tvrdost vs. houževnatost průmyslových nožů,“ 10. Září 2013. [Online]. Available: https://www.mmspektrum.com/clanek/tvrdost-vs-houzevnatost-prumyslovych-nozu. [Přístup získán 11. Květen 2022].

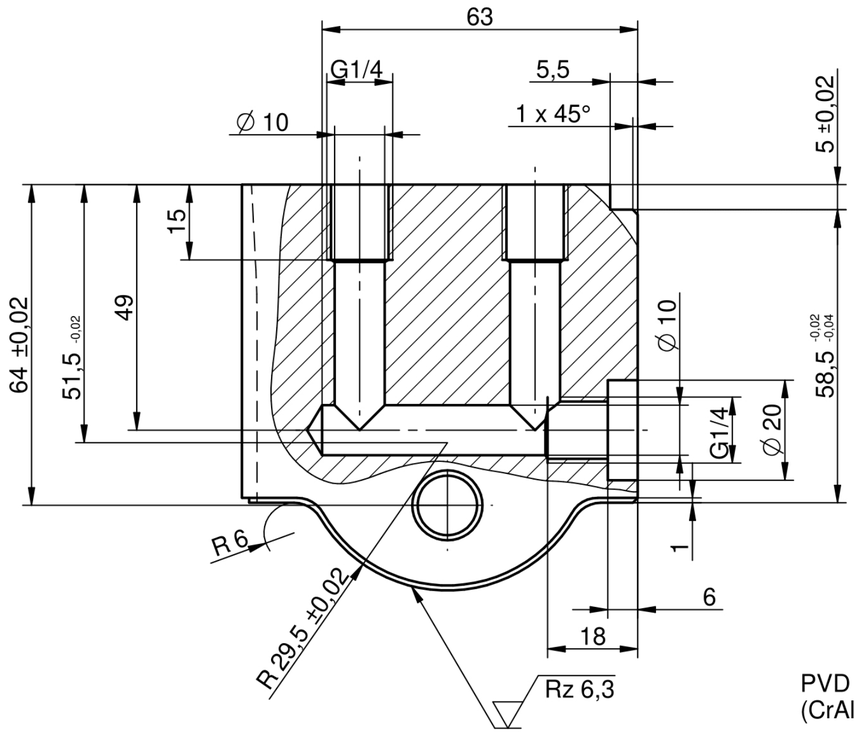
[37] M. Zetek, H. Zídková a I. Česáková, „VLIV TVARU ŘEZNÉ HRANY NÁSTROJE NA PRŮBĚH ŘEZNÉHO PROCESU,“ 2009. [Online]. Available: https://www.mercel.cz/mercelcz_files/drsnost_povrchu.pdf. [Přístup získán 15. Květen 2022].

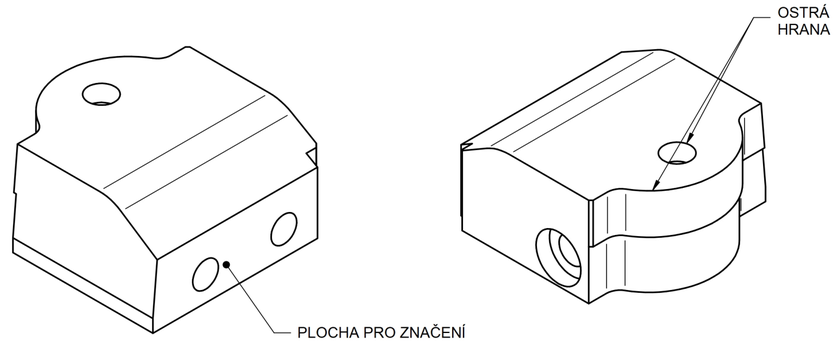
[38] M. Zetek, „Nové koncepce řezných nástrojů,“ Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň.

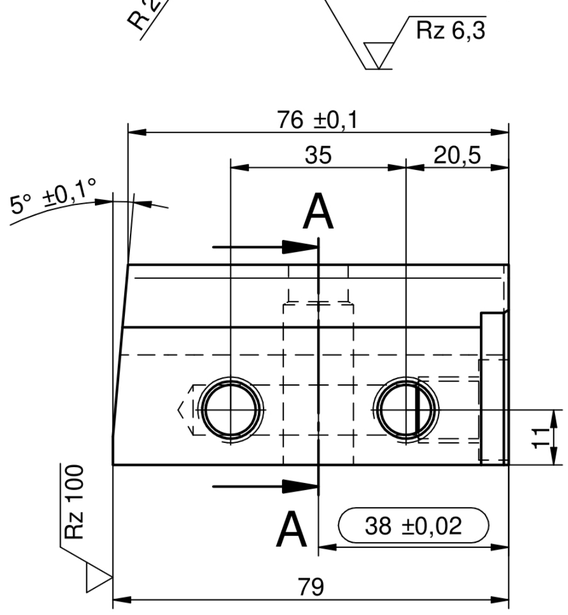
[39] I. Mrkvica a J. Viktorin, „Vliv úpravy břitu monolitních fréz před PVD povlakováním na jejich trvanlivost,“ Vysoká škola báňská, Technická univerzita Ostrava, 2009. [Online]. Available: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/16439/1/Mrkvica.pdf. [Přístup získán 15. Květen 2022].

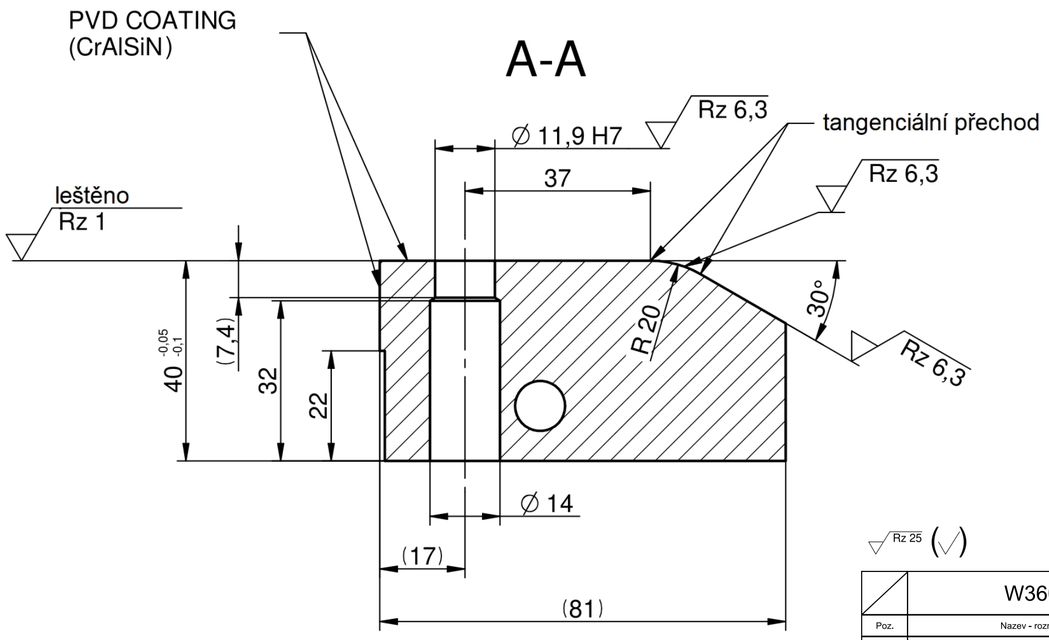
[40] K. Ding a L. Ye, Laser schock peening Performace and process simulation, Florida, USA: Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, 2006.

Tolerance	Rozměry	Maximum	Minimum
11,9 H7	+0,018 0,000	11,918	11,900









Rz 25 (√)

POVRCHOVÁ ÚPRAVA ISO 1302
ÚPRAVA HRAN DIN ISO 13715

	W360		---/---		1,490			
Poz.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material konecny/vychozi	T.O.	C,hmot,	H,hmot	Cislo vykresu sestavy	Pocet ks.
Pos.	Title - size	Blank	End material/Start material	C.W.	Weight	R.weig.	Assembly drawing no.	Quant.

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name
Kreslil / Drawn by		
Prezkousel / Checked by		
Schvalil / Approved by		

Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature

FAKULTA STROJNI
ZAPADOCESKE
UNIVERZITY
V PLZNI

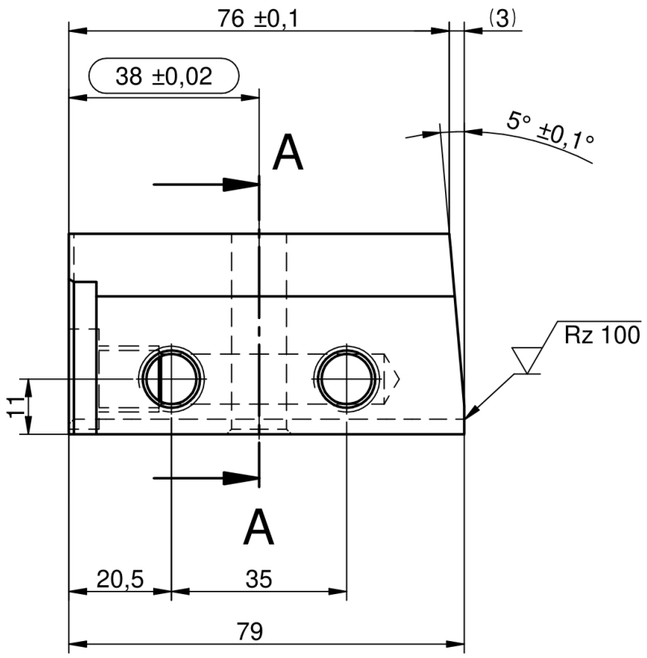
Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved

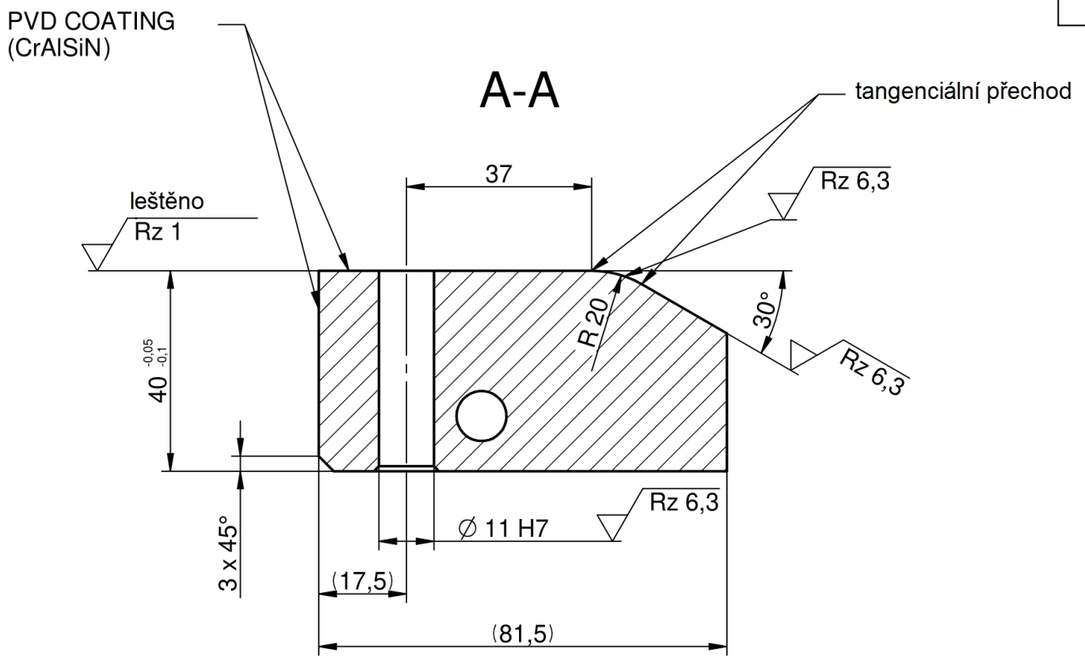
Poznamka / Note:
kalit + popustit
56+2 HRC

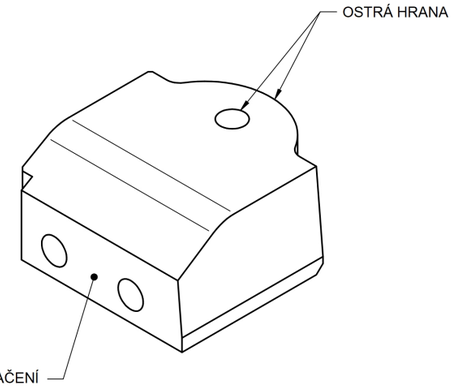
Tolerance / Tolerovani	Soubor-model / ASM-file	Projekt / Project:	Meritko / Scale
ISO 128 ISO 8015 ISO 2768mK	SPODNI MATRICE	DP	1:1
	Soubor-vykres / DRW-file: SPODNI MATRICE	C.sestavy / Assembly No.	

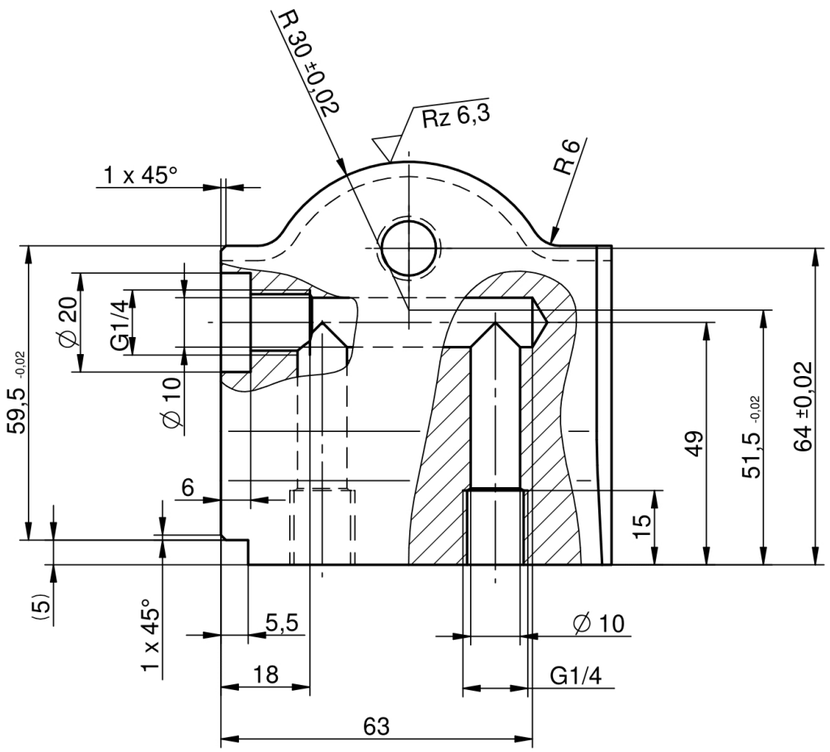
Nazev / Title	Rev.	Cislo vykresu / Drawing No.	Format
SPODNI MATRICE	0	DP-010	A2
		List / sheet no. 1 Pocet listu / sheets 1	

Tolerance	Rozměry	Maximum	Minimum
11 H7	+0,018 0,000	11,018	11,000









Rz 25 (√)

POVRCHOVÁ ÚPRAVA ISO 1302
ÚPRAVA HRAN DIN ISO 13715

	W360		---/---		1,650			
Poz.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material konecny/vychozi	T.O.	C.hmot.	H.hmot	Cislo vykresu sestavy	Pocet ks.
Pos.	Title - size	Blank	End material/Start material	C.W.	Weight	R.weig.	Assembly drawing no.	Quant.

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name
Kreslil / Drawn by		
Prezkousel / Checked by		
Schvalil / Approved by		

Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature

FAKULTA STROJNI
ZAPADOCESKE
UNIVERZITY
V PLZNI

Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved

Poznamka / Note:
kalit + popustit
56+2 HRC

Tolerance / Tolerovani
ISO 128
ISO 8015
ISO 2768mK

Soubor-model / ASM-file: HORNI MATRICE

Soubor-vykres / DRW-file: HORNI MATRICE

Projekt / Project: DP

C.sestavy / Assembly No.

Meritko / Scale: 1:1

Nazev / Title: SVRCHNI MATRICE

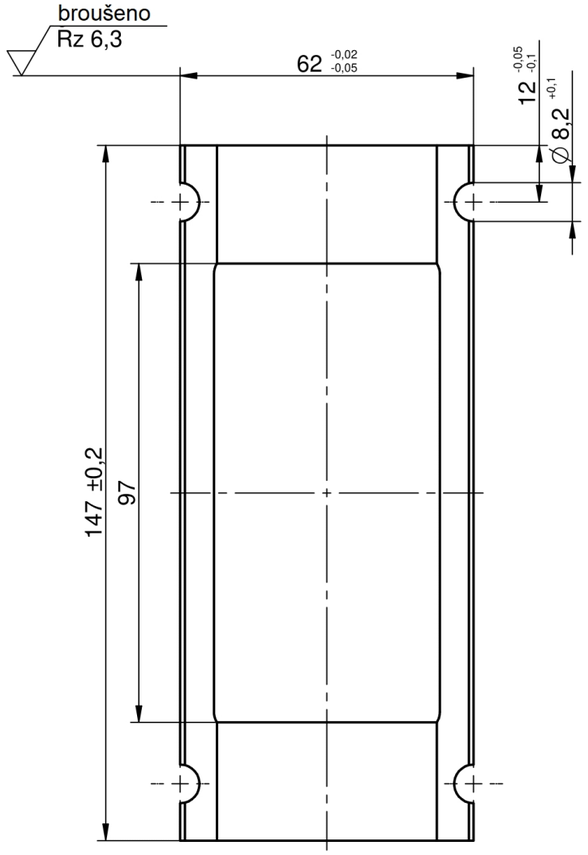
Rev.: 0

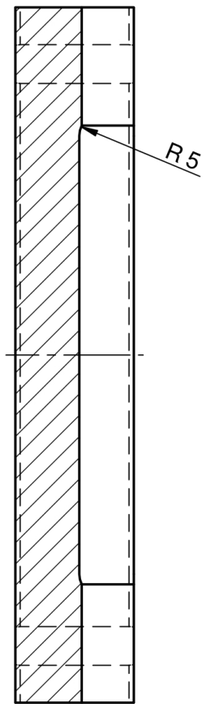
Cislo vykresu / Drawing No.: DP-020

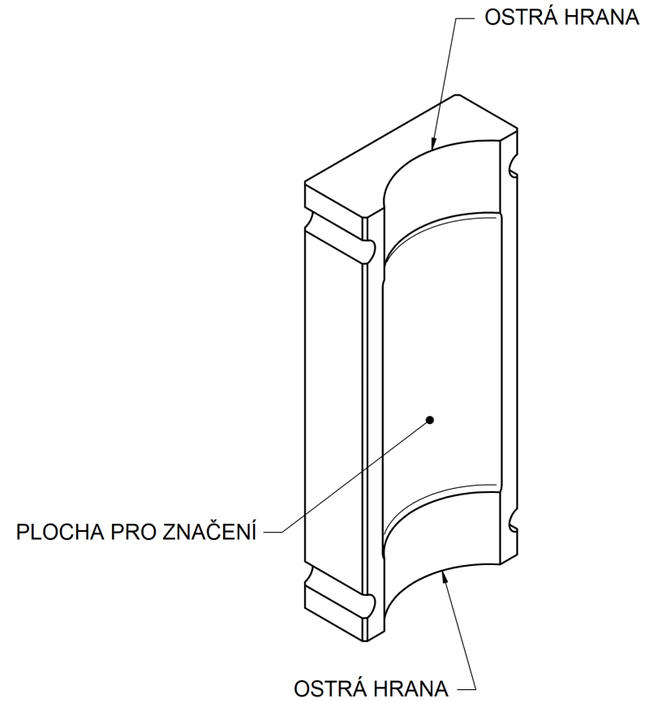
Format: A3

List / sheet no. 1 Pocet listu / sheets 1

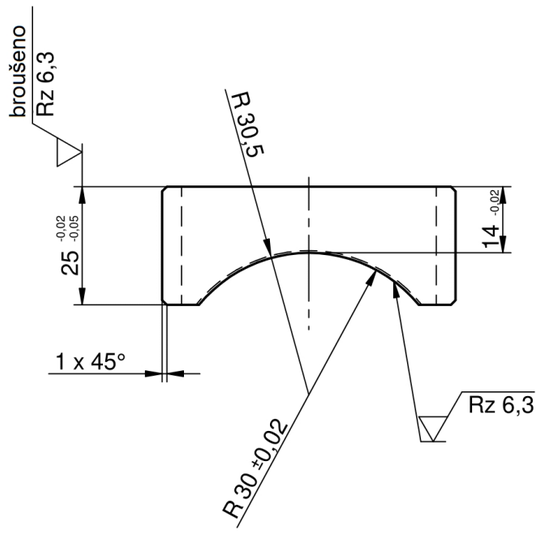
broušeno
Rz 6,3







broušeno
Rz 6,3



Rz 25 ( )

POVRCHOVÁ ÚPRAVA ISO 1302
ÚPRAVA HRAN DIN ISO 13715

	DIN 1.3395		---/---		1,358			
Poz.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material konecny/vychozi	T.O.	C.hmot.	H.hmot	Cislo vykresu sestavy	Pocet ks.
Pos.	Title - size	Blank	End material/Start material	C.W.	Weight	R.weig.	Assembly drawing no.	Quant.

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name
Kreslil / Drawn by		
Prezkousel / Checked by		
Schvalil / Approved by		

FAKULTA STROJNI
ZAPADOCESKE
UNIVERZITY
V PLZNI

Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved

Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature

Poznamka / Note:
kalit + popustit
65+2 HRC

Tolerance / Tolerovani
ISO 128
ISO 8015
ISO 2768mK

Soubor-model / ASM-file: STRIZNY NUZ
Soubor-vykres / DRW-file: STRIZNY NUZ

Projekt / Project: DP
C.sestavy / Assembly No.
Meritko / Scale: 1:1

Nazev / Title: STRIZNY NUZ
Rev.: 0
Cislo vykresu / Drawing No.: DP-030
Format: A3
List / sheet no. 1 Pocet listu / sheets 1

-0,3
+0,3

Výrobní postup

Název	Spodní matrice
Množství	30 ks
Číslo výkresu	DP - 010

MATERIÁLOVÝ LIST

Polotovar	Základní materiál	Celkové množství
4HR, 95x95	W360	1 650 mm

OPERACE - POSLOUPNOST

Operace	Pracoviště Výrobní středisko	Popis operace
0010	Řezat 103400	L = 50
0020	Programovat 107301	
0030	Frézovat 102540	na rozměr 79 x 40,1 (přídavek +0,1 na ploše s Rz 1) * tvarová část s přídavkem 0,3 pro frézování po kalení * pr. 11,9 H7 na pr. 11,5 pro fréz. po kal. * ostatní hotově dle výkresu, dat a tolerancí * s ohledem na přídavek pro brus a fréz. po kalení
0040	Odjehlit 108102	POZOR na střižné hrany!
0050	Označit 108103	číslem výkresu na plochu dle výkresu
0060	Kalení - KOO 103701	vakuově kalit a popustit na 56+2 HRc
0070	Brousit PL 103000	jednostranně na 40 -0,05/-0,1 (plochu s Rz 1) s ohledem na kolmost
0080	Frézovat 102540	tvarovou část s R 29,5 ±0,02 * 1x pr. 11,9 H7 * POZOR na střižné hrany
0090	Odjehlit 108102	upravit po erodování * POZOR na střižné hrany!
0100	Leštit 108102	dle výkresu plochu s Rz 1
0110	Povlakovat 106080	PVD Coating CrAlSiN - v KOO

Výrobní postup

Název	Svrchní matrice
Množství	30 ks
Číslo výkresu	DP - 020

MATERIÁLOVÝ LIST

Polotovar	Základní materiál	Celkové množství
4HR, 95x95	W360	1 650 mm

OPERACE - POSLOUPNOST

Operace	Pracoviště Výrobní středisko	Popis operace
0010	Řezat 103400	L = 50
0020	Programovat 107301	
0030	Frézovat 102540	na rozměr 79 x 40,1 (přídavek +0,1 na ploše s Rz 1) x 84 (pro brus a erodování) * startovací pr. 5 pro pr. 11 H7 * sražení 3x45° * ostatní hotově dle výkresu, dat a tolerancí
0040	Odjehlit 108102	POZOR na střižné hrany!
0050	Označit 108103	číslem výkresu na plochu dle výkresu
0060	Kalení - KOO 103701	vakuově kalit a popustit na 56+2 HRc
0070	Brousit PL 103000	jednostranně na 40 -0,05/-0,1 (plochu s Rz 1) s ohledem na kolmost
0080	Erodovat 103300	tvarovou část s R 30 ±0,02 * 1x pr. 11 H7 * POZOR na střižné hrany
0090	Odjehlit 108102	upravit po erodování * POZOR na střižné hrany!
0100	Leštit 108102	dle výkresu plochu s Rz 1
0110	Povlakovat 106080	PVD Coating CrAlSiN - v KOO

Výrobní postup

Název	Střižný nůž
Množství	30 ks
Číslo výkresu	DP - 030

MATERIÁLOVÝ LIST

Polotovar	Základní materiál	Celkové množství
PL, 75x35	DIN 1.3395	2 355 mm

OPERACE - POSLOUPNOST

Operace	Pracoviště Výrobní středisko	Popis operace
0010	Řezat 103400	L = 152
0020	Programovat 107301	
0030	Frézovat 102540	na rozměr 62,4 x 25,4 x 147,4 (pro brus) včetně sražení 1x45° * u tvarové části vytvořit odlehčení 0,5 mm v délce 97 mm * ostatní hotově dle výkresu, dat a tolerancí
0040	Odjehlit 108102	Pozor na střižné hrany!
0050	Označit 108103	číslem výkresu do tvarového vybrání 0,5 x 97 dle výkresu
0060	Kalení - KOO 103701	vakuově kalit a popustit na 65+2 HRc
0070	Brousit PL 103000	oboustranně na 62 -0,02/-0,05 x 25 -0,02/-0,05 x 147 ±0,2 * přídavky souměrně rozdělit