

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270011 – Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality
Studijní specializace: Bez specializace

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh a optimalizace systému chlazení pro zapichovací nástroje

Autor: Bc. Petr REHÁK
Vedoucí práce: Ing. Luboš KROFT, Ph.D.

Akademický rok 2020/2021

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr REHÁK**
Osobní číslo: **S19N0105P**
Studijní program: **N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality**
Studijní obor: **Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality**
Téma práce: **Návrh a optimalizace systému chlazení pro zapichovací nástroje**
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování

1. Úvod do problematiky a cíle řešení
2. Analýza současného stavu řešené problematiky
3. Návrh variant chladicího systému a jejich funkční řešení
4. Návrh, realizace a vyhodnocení experimentálního měření vybraných variant
5. Technické hodnocení navržených variant
6. Zhodnocení a 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/>).
- SANDVIK Coromant, Sandviken: Technická příručka obrábění, dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/>.
- <http://www.isf.de/de/index.html>
- Elektronické informační zdroje
- Interní podklady ZČU-KTO

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Luboš Kroft, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Konzultant diplomové práce: **Bc. Jindřich Sýkora**
Regionální technologický institut

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2021**

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

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Luboši Kroftovi, Ph.D. za jeho způsob vedení, za čas, který mi během celého průběhu zpracování předložené práce věnoval a za jeho věcné připomínky a rady, které mi poskytl.

Dále děkuji mému konzultantovi Ing. Jindřichu Sýkorovi a také Ing. Ondřeji Maršálkovi za jejich pomoc při výrobě nástrojů použitých v této práci. Rovněž děkuji Ing. Janu Matějkovi za obsluhu stroje a celkový přístup při realizaci experimentu.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. Rehák	Jméno Petr	
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Kroft, Ph.D.	Jméno Luboš	
PRACOVISŤE	ZČU – FST – KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Návrh a optimalizace systému chlazení pro zapichovací nástroje		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2021
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	52	TEXTOVÁ ČÁST	38	GRAFICKÁ ČÁST	9
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Cílem diplomové práce je navrhnout systém chlazení pro vybraný vnitřní zapichovací nůž za účelem prodloužení životnosti. Za tímto účelem byl v této diplomové práci navrhnout a realizován experiment. Protože je vybraný nástroj v praxi používán mimo jiné i při obrábění titanové slitiny Ti-6Al-4V, je teoretická část věnována právě tomuto materiálu. V teoretické části je také stručně popsána technologie zapichování a uveden základní přehled používaných zapichovacích strategií. Z pohledu praktické části je práce věnována z počátku popisu návrhu jednotlivých konstrukčních řešení realizace systému chlazení na daném nástroji. Další část se pak věnuje návrhu, realizaci a vyhodnocení experimentu. Navrženým řešením při zvolených podmínkách bylo dosaženo prodloužení životnosti nástroje.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA	zapichování, soustružení, chlazení hřbetu, kruhová břitová destička, titanová slitina, zvyšování životnosti

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Bc. Rehák	Name Petr	
STUDY PROGRAMME	N0715A270011 Machining, Additive Technology and Quality Assurance		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Kroft, Ph.D.	Name Luboš	
INSTITUTION	ZČU – FST – KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Design and Optimalization of a Cooling System for Grooving Tools		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KTO	SUBMITTED IN	2021
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	52	TEXT PART	38	GRAPHICAL PART	9
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The aim of this diploma thesis is to design a cooling system for a selected internal grooving lathe knife in order to increase the tool life. For this purpose, an experiment was designed and implemented in this thesis. Among other things, selected tool is used in practice for machining titanium alloy Ti-6Al-4V, so theoretical part is devoted to this material. The theoretical part also briefly describes the grooving technology and provides a basic overview of the grooving strategies. The practical part describes the design of individual solutions for the implementation of cooling system on tool. The next part deals with the design, implementation and evaluation of the experiment. The proposed solution under the selected conditions achieved a significant extension of tool life.
KEY WORDS	grooving, turning, flank cooling, round insert, titanium alloy, increasing tool life

Obsah

Přehled použitých zkratk a symbolů.....	9
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek.....	11
Úvod.....	12
1 Analýza současného stavu.....	14
2 Obrábění titanových slitin	17
2.1 Slitina Ti-6Al-4V	19
3 Charakteristika zapichovacího procesu	21
3.1 Nástroje pro zapichování.....	21
3.2 Zapichovací strategie.....	22
3.2.1 Zapichování jedním řezem	22
3.2.2 Vícenásobné zapichování	22
3.2.3 Ponorné soustružení.....	22
3.2.4 Šikmé zahlubování	23
3.2.5 Dokončovací zapichování	23
3.2.6 Trochoidní soustružení	24
3.2.7 Vnitřní zapichování	24
4 Návrh variant chladícího systému a jejich funkční řešení	25
4.1 Postup návrhu.....	26
4.2 Varianta A	27
4.2.1 Upínka	28
4.2.2 Tělo.....	29
4.3 Varianta B.....	30
4.4 Varianta C.....	31
4.5 Výroba nástrojového držáku.....	32
5 Návrh, realizace a vyhodnocení experimentálního měření vybraných variant.....	33
5.1 Podmínky v PCC	33
5.1.1 Obráběný díl	33
5.1.2 Strategie obrábění.....	34
5.1.3 Řezné podmínky.....	34
5.2 Popis experimentu	34
5.3 Podmínky experimentu.....	36
5.3.1 Použité nástroje	36
5.3.2 Použitá vyměnitelná břitová destička	36
5.3.3 Strojní vybavení a další zařízení použité při experimentu.....	37
5.3.4 Strategie obrábění.....	37

5.3.5	Řezné podmínky	37
5.4	Předpokládaný průběh experimentu	38
5.5	Průběh experimentu.....	38
5.5.1	Test 1	38
5.5.2	Test 2	42
6	Technické hodnocení navržených variant	45
6.1	Chování nástrojů během experimentu	45
6.1.1	Test 1	45
6.1.2	Test 2	45
6.1.3	Vyhodnocení životnosti.....	47
6.2	Závěrečné zhodnocení	47
	Závěr.....	49
	Seznam použitých zdrojů	50
	Seznam příloh.....	52

Přehled použitých zkratk a symbolů

Zkratka, symbol	Význam	Jednotka
VBD	Vyměnitelná břitová destička	-
HPC	High Pressure Coolant – vysokotlaké chlazení	-
CVD	Chemical Vapor Deposition – chemická depozice z plynné fáze	-
v_c	Řezná rychlost	m/min
f	Posuv na otáčku	mm/ot.
a_p	Hloubka řezu	mm
p	Tlak	bar
ANOVA	Analýzy rozptylu	-
VB	Hodnota opotřebení hřbetu břitové destičky	mm
VB_{krit}	Kritériální hodnota opotřebení hřbetu břitové destičky	mm
VB_{max}	Maximální hodnota opotřebení hřbetu břitové destičky	mm
n	Otáčky	ot.
R_m	Mez pevnosti	Pa
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	Pa
HV	Tvrдость dle Vickerse	-
ρ	Hustota	kg/m ³
F	Síla	N
κ_r	Úhel nastavení hlavního ostří	°
CAD	Computed Aided Design – počítačová podpora konstrukce	-
CAM	Computed Aided Manufacturing – počítačová podpora výroby	-
RTI	Regionální technologický institut	-
PCC	Precision Castparts CZ, s. r. o.	-
t	Čas řezné destičky v řezu	min
R_a	Průměrná aritmetická odchylka profilu drsnosti	μm
R_z	Nejvyšší výška profilu drsnosti	μm
ISO	International Organization for Standardization – mezinárodní organizace pro normalizaci	-
ČSN	Česká technická norma	-
KTO	Katedra technologie obrábění	-

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Schematické znázornění teplot při soustružení titanové slitiny a uhlíkové oceli ($v_c = 30$ m/min, $f = 0,2$ mm/ot., $a_p = 4$ mm). [24]	17
Obr. 2.2: Vliv vysokotlakého chlazení na proces obrábění. [13]	18
Obr. 2.3: Závislost měrné meze kluzu v tahu na teplotě vybraných materiálů. [19]	20
Obr. 2.4: Závislost meze pevnosti při tečení (s dobou lomu 1000 hod.) na teplotě vybraných materiálů. [19]	20
Obr. 3.1: Rozložení složek řezných sil na zapichovacím noži v závislosti na úhlu nastavení hlavního ostří. [10]	21
Obr. 3.2: Zapichování jedním řezem. [20]	22
Obr. 3.3: Vícenásobné zapichování. [20]	22
Obr. 3.4: Ponorné soustružení. [20]	23
Obr. 3.5: Šikmé zahlubování. [20]	23
Obr. 3.6: Doporučený postup při dokončovací operaci při obrábění zápichů. [20]	23
Obr. 3.7: Trochoidní soustružení. [20]	24
Obr. 4.1: Soustružnický nůž SL70-SRDCR-50-12HP. [23]	25
Obr. 4.2: Označení nástrojového držáku dle ISO.	25
Obr. 4.3: Základní CAD model nástrojového držáku SL70-SRDCR-50-12HP	26
Obr. 4.4: 1. etapa návrhu systému chlazení.	26
Obr. 4.5: Sestava prototypového nástroje – varianta A	27
Obr. 4.6: Kontrola minimálního pracovního průměru	28
Obr. 4.7: Upínka – varianta A.	28
Obr. 4.8: Nasměrování trysek upínky	29
Obr. 4.9: Nástrojový držák – varianta A.	29
Obr. 4.10: Nástrojový držák bez úpravy lůžka VBD.	30
Obr. 4.11: Nástrojový držák s úpravou lůžka VBD.	30
Obr. 4.12: Upínka a nástrojový držák – varianta B.	31
Obr. 4.13: Sestava prototypového nástroje – Varianta C.	31
Obr. 5.1: Obráběný díl L04860PRE-SONIC-NEO IBR3	34
Obr. 5.2: Dráhy nástroje při obrábění vnitřní kapsy	34
Obr. 5.3: Upnutí obrobku v prostoru stroje.	35
Obr. 5.4: Specifikace použité VBD dle ISO značení.	36
Obr. 5.5: Měření parametru opotřebení hřbetu VB.	38
Obr. 5.6: Měření parametru opotřebení hřbetu VB u konvenčního nástroje.	40
Obr. 5.7: Graf závislost růstu opotřebení hřbetu VBD na způsobu chlazení – Test 1	40
Obr. 5.8: Graf závislosti parametru kvality povrchu obrobené plochy Ra na opotřebení hřbetu VBD – Test 1.	41
Obr. 5.9: Graf závislosti parametru kvality povrchu obrobené plochy Rz na opotřebení hřbetu VBD – Test 1.	41
Obr. 5.10: Graf závislosti růstu opotřebení hřbetu VBD na způsobu chlazení – Test 2.	43
Obr. 5.11: Graf závislosti parametru kvality povrchu obrobené plochy Ra na opotřebení hřbetu VBD – Test 2.	43
Obr. 5.12: Graf závislosti parametru kvality povrchu obrobené plochy Rz na opotřebení hřbetu VBD – Test 2.	44
Obr. 6.1: Opotřebení hřbetu VBD u prototypového nástroje po 6. přejezdu	45
Obr. 6.2: Růst opotřebení na hřbetu VBD u konvenčního nástroje – test 2, 2. opakování	46
Obr. 6.3: Růst opotřebení na hřbetu VBD u prototypového nástroje – test 2, 2. opakování.	46
Obr. 6.4: Graf průměrné životnosti testovaných nástrojů.	47

Seznam tabulek

Tab. 2.1: Chemické složení slitiny Ti-6Al-4V dle normy W-Nr. 3.7165.....	19
Tab. 2.2: Porovnání vybraných mechanických vlastností slitiny Ti-6Al-4V s dalšími materiály.....	19
Tab. 5.1: Řezné podmínky v PCC.....	34
Tab. 5.2: Řezné podmínky Test 1.....	37
Tab. 5.3: Řezné podmínky Test 2.....	37
Tab. 5.4: Naměřené a dopočtené hodnoty – Test 1 – konvenční nástroj.....	39
Tab. 5.5: Naměřené a dopočtené hodnoty – Test 1 – prototypový nástroj.....	39
Tab. 5.6: Naměřené a dopočtené hodnoty – Test 2 – konvenční nástroj.....	42
Tab. 5.7: Naměřené a dopočtené hodnoty – Test 2 – prototypový nástroj.....	42

Úvod

Trendem dnešní doby v průmyslové praxi je kladení důrazu na snižování nákladů, a tím pádem na zvyšování produktivity. Současně s vývojem technologií se do popředí dostávají materiály, které se v dřívějších dobách nepoužívaly tak hojně jako dnes, protože s dobovou technologií byly špatně zpracovatelné. Mezi takové materiály se řadí i titanové slitiny, které jsou charakterizovány dobrými mechanickými vlastnostmi, ale také špatnou obrobitelností. V mnoha strojírenských výrobcích a součástech je slitina Ti-6Al-4V široce používána díky své odolnosti proti korozi a zachování vysoké měrné pevnosti a houževnatosti. V leteckém, automobilovém, elektronickém, ale i kosmickém průmyslu se z titanových slitin vyrábějí klíčové součásti. Obtížná obrobitelnost slitiny Ti-6Al-4V je způsobena nízkým modulem pružnosti a vysokým tepelným zpevněním. Tento materiál také vykazuje špatnou tepelnou vodivost a intenzivní chemickou afinitu během obrábění. Ve výsledku to znamená velmi intenzivní opotřebení nástroje. Z tohoto pohledu je obrábění této slitiny za podmínek suchého řezání neekonomické a v praxi se nedoporučuje.

Aby bylo možné regulovat nepříznivé účinky vysokých teplot, považuje se za vhodné použití chladicího média, nejčastěji řezné kapaliny. Dříve bylo praktikováno záplavové chlazení, při kterém je do místa řezu za nízkého tlaku přiváděno velké množství řezné kapaliny. Tím však není dosaženo účinného chlazení, protože kvůli nízkému tlaku řezná kapalina neproniká do kritického bodu v sekundární smykové zóně. Z tohoto pohledu je vhodné použít záplavové chlazení při obrábění nízkými řeznými rychlostmi, což však snižuje produktivitu obrábění. Proto aby bylo dosaženo vyšší produktivity bez ovlivnění kvality se v současné době praktikuje aplikace přesného vysokotlakého přívodu řezné kapaliny do místa řezu. Bylo provedeno několik výzkumů a studií zaměřené na porovnávání životnosti nástrojů při různém způsobu chlazení. Výsledky několika prací potvrzují příznivé účinky aplikace vysokotlakého chlazení při kombinaci chlazení čela i hřbetu VBD na životnost nástroje.

Na trhu však není mnoho komerčně dostupných nástrojů, které tuto možnost kombinovaného chlazení umožňují, a tak je nutné za tímto účelem vytvářet vlastní prototypové nástroje. To je také předmětem této diplomové práce, která si klade za cíl v první řadě vytvořit z komerčně dostupného nástroje pro vnitřní zapichování, který umožňuje přívod řezné kapaliny tělem nástroje jen na čelo VBD, nástroj, který umožní řeznou kapalinu přivést jak na čelo, tak i na hřbet VBD. Následně je práce zaměřena na experimentální řešení posouzení jednotlivých variant navržených řešení, a to z hlediska porovnání životnosti prototypového nástroje s životností konvenčního nástroje.

K návrhu funkčního řešení je nutné se v dané problematice orientovat, proto je v této práci nejprve provedena analýza vybraných studií, které se tímto tématem zabývaly. Mimo jiné i diplomové práce z minulého akademického roku studenta Ondřeje Šindeláře, která si kladla velmi podobné cíle, s tím rozdílem, že byl použit jiný nástroj. Konkrétně se jednalo o vnější soustružnický nůž, který byl vybrán pro jeho experiment na základě univerzálnosti použití při různých strategiích obrábění, čímž byl tento nástroj považován za vhodný pro prvotní výzkum v této oblasti. Hlavní myšlenkou této práce je pak aplikovat podobné řešení na vybraný nástroj, který je v praxi používán pro konkrétní aplikaci, a to k hrubování vnitřní kapsy. V další části je pak teoreticky popsáno obrábění slitiny Ti-6Al-4V a obecně popsána strategie zapichování.

V praktické části práce je nejprve popsáno provedení konvenčního nástroje, tak jak je k dostání od výrobce. Následuje popis tří variant řešení přívodu řezné kapaliny na hřbet VBD, které byly pro práci navrženy a jejich zdůvodnění. Na popis variant řešení navazuje experimentální část práce, kde je nejdříve navržen experiment pro porovnání životností nástrojů při podélném soustružení a popsán jeho předpokládaný průběh. Výsledky jsou pak nejprve zanalyzovány a v závěru práce vyhodnoceny. Experiment si kladl za cíl potvrdit příznivé účinky kombinovaného typu chlazení VBD na její životnost, tak jak tomu bylo v diplomové práci Šindeláře.

1 Analýza současného stavu

Před začátkem tvorby samotné práce je třeba vycházet z již provedených experimentů a jejich závěrů. Proto jsou v této kapitole popsány vybrané experimenty dalších autorů z minulých let, na jejichž základě lze odhadovat výsledky experimentu navrženého pro tuto práci.

Důležitým předpokladem pro funkčnost navrženého modelu je aplikace vysokotlakého chlazení VBD (HPC). Práce autorů Khana, Mii a Dhara z roku 2017 zkoumá význam a účinky HPC při obrábění titanové slitiny Ti-6Al-4V. Předmětem zkoumání byl vliv použití HPC na průběh řezných sil, teplotu řezání a charakteristiku třísky v porovnání se suchým obráběním. Za tímto účelem byly vyrobeny speciální trysky, které dovolily v průběhu procesu obrábění současně chladit jak čelo, tak hřbet VBD.

Měření probíhalo při podélném soustružení tyče nástrojem PSBNR 2525M12 a destičkou SNMG 120408 s deponovanými tenkými vrstvami TiC/Al₂O₃/TiN metodou CVD za těchto řezných podmínek:

- $v_c = 78, 112, 156$ m/min,
- $f = 0,12; 0,14; 0,16$ mm/ot.,
- $a_p = 2$ mm,
- $p = 80$ bar.

Při každém přejezdu byly měřeny a zaznamenány hodnoty hlavní řezné síly, posuvové síly, teploty řezu a koeficientu pěchování třísky. Ze souboru dat byly vyloučeny všechny nepravděpodobné hodnoty a pro tyto konkrétní parametry byla provedena nová měření. Získaná data pak byla statisticky zanalyzována metodou ANOVA. Na základě výsledků této analýzy bylo prohlášeno, že největší vliv na průběh řezání mají řezná rychlost, řezné prostředí a posuv.

V závěru pak byly shrnuty následující tvrzení:

- HPC je vhodné při soustružení obtížně obrobitelné Ti slitiny z hlediska vytvoření příznivých podmínek obrábění (síla a teplota).
- Výběr prostředí pro obrábění velmi ovlivňuje řezné síly, teplotu řezu a koeficient pěchování třísek.
- Chlazením hřbetu nástroje je dosaženo účinnějšího chladícího účinku.
- Vysoký tlak řezné kapaliny způsobil pokles řezné síly v důsledku poklesu tření a délky kontaktu třísky s čelem nástroje (hydraulický klín). To také přispělo ke snížení teploty řezání. Prostřednictvím HPC však nebyl snížen koeficient pěchování třísek a tvořily se spojitě třísky, které nejsou tak vhodné z hlediska kvality obroběného povrchu jak třísky dělené.
- Malý posuv je zodpovědný za malou řeznou sílu a teplotu, zatímco velký posuv je považován za důsledek malého koeficientu pěchování třísky. Vysoká rychlost má tendenci vytvářet malé řezné síly a koeficient pěchování třísek, zatímco nízká rychlost generuje nízkou řeznou teplotu. Suché prostředí je vhodné pro minimální součinitel pěchování třísek a HPC je vhodné pro minimální řezné síly a teplotu. [1]

Stejní autoři poté provedli experiment se stejnými podmínkami, ve kterém však zkoumali drsnost obroběného povrchu a průběh opotřebení VBD místo výše uvedených parametrů. V závěru pak uvádějí tato tvrzení:

- Menší drsnost povrchu při HPC je způsobeno lepším mazáním na rozhraní nástroj-obrobek. Hydraulický klín ve větší míře zabraňuje tření třísky po obrobeném povrchu. Drsnost povrchu je také menší s vyšší řeznou rychlostí a nižším posuvem. To je přičítáno nízké adhezi, snížené tvorbě nárůstku a menšímu vytvrzení.
- Dominantním mechanismem opotřebení při obrábění za sucha je vznik vrubu a vylamování ostří, zatímco pod chladicí kapalinou je patrné nadměrné tření na čele a hřbetu spolu s adhezí. Tato opotřebení vznikají vlivem změkčení materiálu díky nízké tepelné vodivosti titanové slitiny při řezání za sucha, respektive termomechanickému účinku HPC.
- Životnost nástroje se zvýší o minimálně 40%, pokud je zavedeno HPC. [2]

Tato diplomová práce pak navazuje na výsledky a metodiku řešení diplomové práce studenta Ondřeje Šindeláře z akademického roku 2019/2020. Cílem Šindelářovi práce bylo porovnat životnosti dvou typů nástrojů při hrubovacím podélném soustružení titanové slitiny Ti-6Al-4V za různých podmínek chlazení. Jedním z nástrojů byl komerčně dostupný vnější soustružnický neutrální nůž s označením C5 SRDCN-12HPA s možností vysokotlakého přívodu řezné kapaliny tělem nástroje k chlazení čela VBD. Modifikací tohoto nástroje vznikl prototypový nástroj s přívodem řezné kapaliny jak na čelo, tak na hřbet VBD. Toho bylo dosaženo prostřednictvím dvou upínek. Upínka pro chlazení čela byla navržena za účelem přesnějšího, a především bližšího přívodu řezné kapaliny. Upínka pro chlazení hřbetu pak z důvodu samotného chlazení hřbetu VBD. Byly realizovány 2 experimenty.

Cílem prvního z nich bylo porovnat vliv různých systémů přívodů a různého tlaku řezné kapaliny na životnost nástrojů. Jednalo se o plánovaný úplný faktorový experiment na dvou úrovních, kde jsou kombinovány faktory kvalitativního charakteru (typ nástroje, způsob chlazení) a kvantitativního (hodnota tlaku). Konstantní řezné podmínky byly nastaveny takto:

- $v_c = 90$ m/min,
- $f = 0,25$ mm/ot.,
- $a_p = 2$ mm.

Tlak řezné kapaliny byl nastaven buď na 20 barů nebo 100 barů. Kriteriaální hodnotou, při které byly jednotlivá měření ukončena byla zvolena hodnota $VB_{krit} = 0,3$ mm. Experiment se skládal ze 6 typů pokusů, kdy každý pokus byl opakován třikrát.

Výsledkem pak bylo zjištění, že přesněji směřovaná řezná kapalina na čelo VBD neměla přímý vliv na prodloužení životnosti nástroje. Avšak byl prokázán pozitivní vliv kombinovaného chlazení čela a hřbetu VBD na životnost nástroje, kdy průměrná hodnota životnosti všech variant využívající pouze čelní chlazení dosahuje pouze 80 % průměrné hodnoty variant s kombinovaným typem chlazení.

Druhý experiment pak byl realizován se stejným vybavením jako první, ale cílem bylo zjištění vlivu řezné rychlosti na životnost obou variant nástrojů. Konstantní řezné podmínky byly nastaveny takto:

- $f = 0,25$ mm/ot.,
- $a_p = 2$ mm.

Proměnlivými parametry zde byla řezná rychlost (110 a 130 m/min) a tlak řezné kapaliny (75 a 100 barů). Experiment se skládal ze 4 typů pokusů, kdy každý pokus byl opakován jedenkrát, což znamená, že výsledky byly prohlášeny za vstupní podklad pro budoucí detailnější zkoumání.

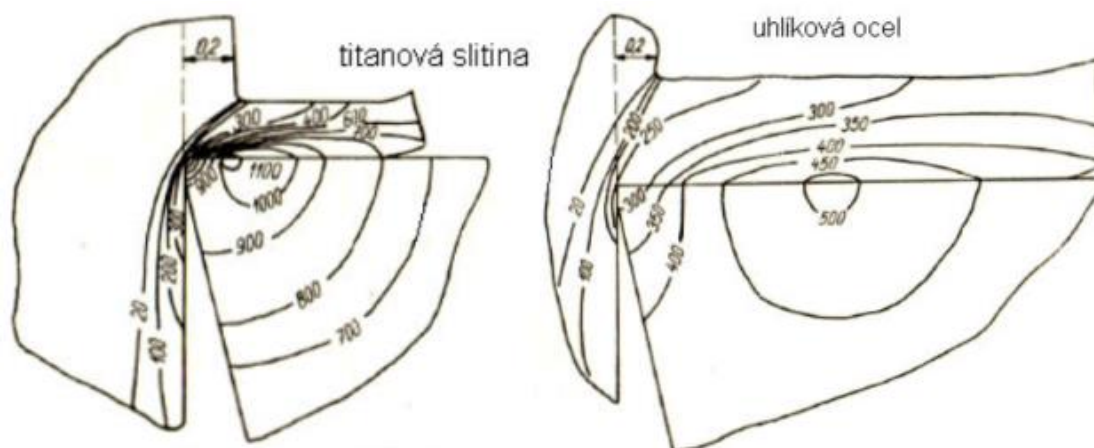
Významného rozdílu životností bylo dosaženo při hodnotě řezné rychlosti $v_c = 110$ m/min, kdy prototypový nástroj dosáhl delší životnosti o 69 % oproti nástroji konvenčnímu. Při hodnotě řezné rychlosti $v_c = 130$ m/min byla životnost prototypového nástroje také delší, avšak ne tak výrazně, jak tomu bylo v prvním případě, konkrétně o 31 %. Z tohoto zjištění lze předpokládat, že rozdíl životností mezi danými technologickými variantami se s rostoucí řeznou rychlostí zmenšuje. [3]

2 Obrábění titanových slitin

Titan je velmi tvrdý a lehký kov ocelového vzhledu. Jeho unikátními vlastnostmi jsou nejvyšší poměr mezi pevností a hustotou ze všech kovových materiálů, vysoká pevnost v tahu, vysoká korozní odolnost a vysoká biokompatibilita. Dále má nízkou tepelnou vodivost, špatné třecí vlastnosti a oproti oceli nižší Youngův modul pružnosti v tahu. Jeho slitiny se pak rozdělují do 3 základních skupin podle modifikace jeho krystalové mřížky na slitiny α , slitiny $\alpha+\beta$ a slitiny β . Obecně se tyto slitiny používají tam, kde slitiny Al nebo Mg nesplňují pevnostní a tepelné požadavky, při vysokých nárocích na korozní odolnost a při požadavku vysoké meze kluzu při nižší hustotě materiálu. [1, 4]

Titan a jeho slitiny jsou spolu s vysokoteplotními slitinami dle ISO 513 zařazeny do skupiny materiálů ISO S. Jedná se o skupinu těžkoobrobitelných materiálů, které jsou charakteristické tím, že během jejich obrábění snadno ulpívají na břitu a tvoří nárůstek, vzniká velké množství tepla a dochází k jejich zpevňování. [5]

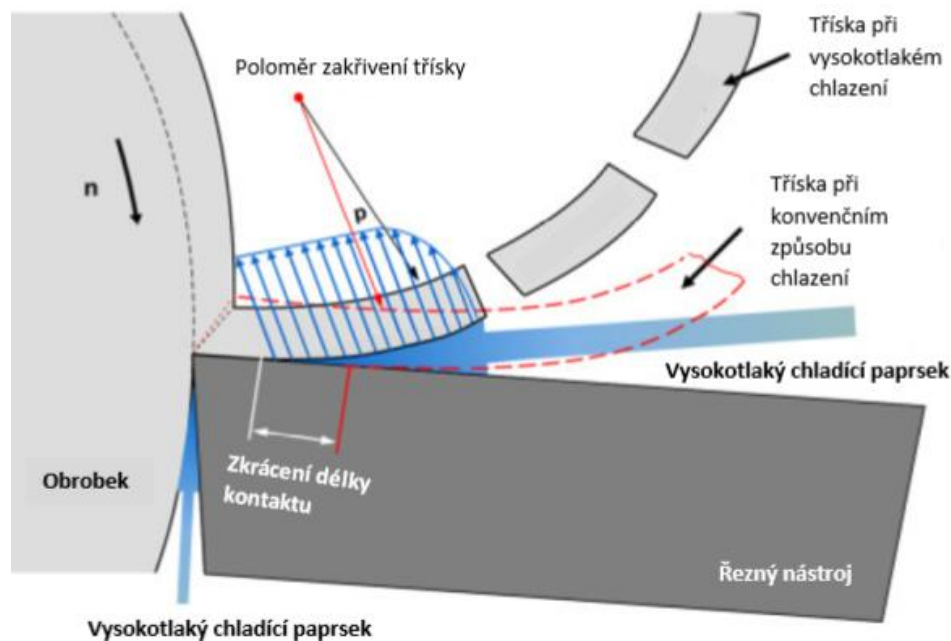
Titanové slitiny jsou ve srovnání s jinými materiály hůře obrobitelné díky jejich mechanickým a materiálovým vlastnostem. Jde hlavně o nízkou tepelnou vodivost, vysokou chemickou reaktivitu a nízký modul pružnosti. Při obrábění titanových slitin je typické vytváření segmentové třísky. Tato tříška je tvořena segmenty, které jsou od sebe odděleny úzkými oblastmi, ve kterých dochází k odpevnění materiálu vlivem koncentrace vysoké teploty. Dochází zde k plastické deformaci skluzem a vznik těchto skluzových rovin je nejvíce ovlivněn řeznými podmínkami, především pak řeznou rychlostí. Segmentová tříška má významný vliv na dynamiku procesu obrábění, protože dochází k cyklické změně řezné síly, to může vyvolat vibrace a chvění nástroje. Většina mechanické energie se při obrábění mění v teplo, a protože je tepelná vodivost titanových slitin, v porovnání s jinými materiály, velmi malá, dochází k intenzivnímu zahřívání místa řezu. Nejvyšších teplot je dosaženo v oblasti sekundární plastické deformace, to znamená vlivem tření třísky a čela nástroje. Teplo je z místa řezu, kvůli malé tepelné vodivosti materiálu, špatně odváděno prostřednictvím obrobku a třísky, a tak dochází k rychlému zahřívání řezného nástroje. V kombinaci se značným mechanickým namáháním to vede k jeho intenzivnímu opotřebení, velmi často k plastické deformaci řezného břitu. Vlivem vysokých teplot také dochází k difúznímu opotřebení řezné části nástroje. Rozložení teplot při soustružení titanové slitiny, v porovnání s teplotami při soustružení uhlíkové oceli, je schematicky znázorněno na obr. 2.1. [1, 3, 7, 8, 12]



Obr. 2.1: Schematické znázornění teplot při soustružení titanové slitiny a uhlíkové oceli ($v_c = 30$ m/min, $f = 0,2$ mm/ot., $a_p = 4$ mm). [24]

Z tohoto pohledu je, za předpokladu použití slinutého karbidu jako řezného materiálu, vhodnější použít slinutých karbidů na bázi karbidu wolframu než na bázi karbidu titanu, který je k opotřebení vlivem difúze náchylnější. V důsledku otupování řezné hrany nástroje dochází k nárůstu hloubky zpevněné vrstvy materiálu obrobku. [1, 7]

Z výše uvedených faktorů vyplývají charakteristické problémy při obrábění titanových slitin. Obecně je doporučeno obrábět nižšími řeznými rychlostmi než při obrábění běžných ocelí, protože právě řezná rychlost má největší vliv na teplotu v místě řezu. Vzhledem k vysokému mechanickému namáhání břitu je doporučena pozitivní geometrie řezného břitu. Mezi další doporučení patří nepřerušovat řez, vysoké hodnoty posuvu a hloubky řezu a použití karbidových VBD větších rozměrů tak, aby bylo dosaženo většího absorbování tepla nástrojem. Negativní účinky vysoké teploty při procesu obrábění lze zmírnit vhodným použitím systému chlazení prostřednictvím procesní kapaliny. Procesní kapalina má vedle chladicího účinku také vliv na odvod třísek z místa řezu a zajišťuje lubrikaci v místě kontaktu mezi nástrojem a obráběným materiálem. Pro nejlepší výsledky je nutné procesní kapalinu přivádět po vysokém tlakem a na přesně definovaná místa. Nejčastěji používanou metodou je přívod vysokotlakého proudu řezné kapaliny do prostoru mezi čelo nástroje a třísku. Jedná se o přesné vysokotlaké chlazení, kdy vzniká hydraulický klín, který má pozitivní dopad na dělení třísek tím, že snižuje poloměr zakřivení odchodu třísky. Dále způsobuje zmenšení délky kontaktu mezi nástrojem a třískou, což má za následek nižší tření, snížení řezné síly a nižší tepelné zatížení nástroje. Vliv vysokotlakého proudu chladicí kapaliny ovlivňující proces obrábění je znázorněn na obr. 2.1. Dalším možným přístupem je přívod řezné kapaliny do prostoru mezi hřbet nástroje a obrobený povrch. Tím je dosaženo intenzivnější chlazení ostří, což má příznivý vliv na opotřebení hřbetu nástroje. Při soustružení titanových slitin je proto vhodné procesní kapalinu přivádět na VBD z horní i dolní strany, kdy se chlazením hřbetu VBD dosáhne intenzivnějšího chladicího účinku, a tím pádem k prodloužení životnosti nástroje. Hodnoty tlaků procesní kapaliny při vysokotlakém chlazení jsou přibližně 70 barů a více. Aby tento způsob chlazení bylo možné realizovat, musí k tomu být uzpůsobeny nástrojové systémy stejně tak jako obráběcí stroj, respektive čerpadlo procesní kapaliny. [6, 7, 9, 13]



Obr. 2.2: Vliv vysokotlakého chlazení na proces obrábění. [13]

2.1 Slitina Ti-6Al-4V

Je to jedna z nepoužívanějších titanových slitin, která svou mřížkou spadá do skupiny slitin $\alpha+\beta$. Byla původně vyvinuta na výrobu lopatek plynových turbín. Obecně lze konstatovat, že se používá především v místech, kde má na užitnou a funkční hodnotu výrobku zásadní vliv hmotnost. V současnosti nachází uplatnění nejčastěji v leteckém průmyslu jako materiál kostry letadel nebo součástí motorů. Je také aplikována u součástí pro použití ve slané vodě. Dlouhou dobu také patřila mezi nepoužívanější biokompatibilní materiál, ale vzhledem k podezření na toxicitu hliníku a vanadu se nahrazuje jinými slitinami. Mezní obsahy prvků dle normy W-Nr. 3.7165 jsou uvedeny v tabulce 2.1. Pro ilustraci je v příloze č. 1 k nahlédnutí materiálový list pro jednu konkrétní specifikaci této slitiny. [12, 14]

Tab. 2.1: Chemické složení slitiny Ti-6Al-4V dle normy W-Nr. 3.7165.

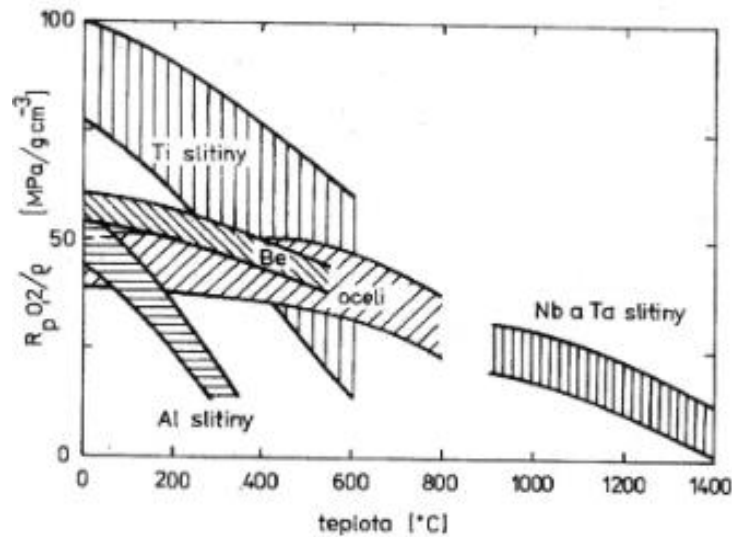
Chemické složení slitiny Ti-6Al-4V							
Prvek	Al	V	Fe	N	H	C	Ti
Obsah prvku [hm.%]	5,50 – 6,75	3,50 – 4,50	0,40	0,05	max. 0,015	0,08	zbytek

Rozmezí hodnot vybraných mechanických vlastností, kterých může slitina dosahovat, jsou uvedeny v tab. 2.2. Konkrétní hodnoty záleží na přesném chemickém složení dané slitiny a na tepelném zpracování. V tabulce jsou pak uvedeny mechanické vlastnosti dalších materiálů používaných v leteckém průmyslu.

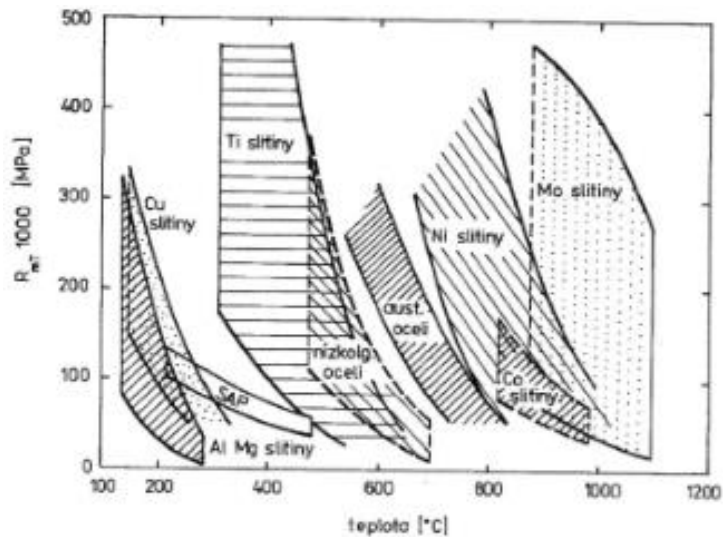
Tab. 2.2: Porovnání vybraných mechanických vlastností slitiny Ti-6Al-4V s dalšími materiály.

Porovnání vybraných mechanických vlastností slitiny Ti-6Al-4V s dalšími materiály				
Materiál	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	HV	ρ [g/cm ³]
AlCu4Mg [15]	360 – 400	220 – 270	110	2,8
Ti6Al4V [12]	890 – 1200	800 – 1000	300 – 400	4,43
Inconel 713lc [16]	850 – 1020	780 – 900	260 – 280	7,87
ASTM F75 [17]	780 – 1180	480 – 840	320	8,77

Materiály uvedené v tabulce 2.2 byly vybrány z důvodu použití jako materiály jednotlivých částí pohonných soustav letadel. Tyto části jsou kombinovaně staticky i dynamicky namáhány na tah, tlak, ohyb a krut vlivem odstředivých sil vyvolaných vlastní hmotností vlivem tepelného pnutí či vibracemi. Povrch součástí je vystaven vysokým teplotám a s tím spojeným degradačním procesům jako je vysokoteplotní koroze, oxidace a eroze. Na základě těchto skutečností jsou odvozeny požadavky na mechanické vlastnosti použitých materiálů. Rozhodujícími vlastnostmi při volbě materiálů pro jednotlivé části pohonných soustav letadel je tedy vysoká pevnost, vysoká korozní odolnost a stálost mechanických vlastností při tepelném zatížení, nízká tepelná roztažnost, nízká měrná hmotnost a cena. Závislost vybraných mechanických vlastností v závislosti na teplotě některých materiálů jsou znázorněny na obr. 2.3 a obr. 2.4. [18]



Obr. 2.3: Závislost měrné meze kluzu v tahu na teplotě vybraných materiálů. [19]



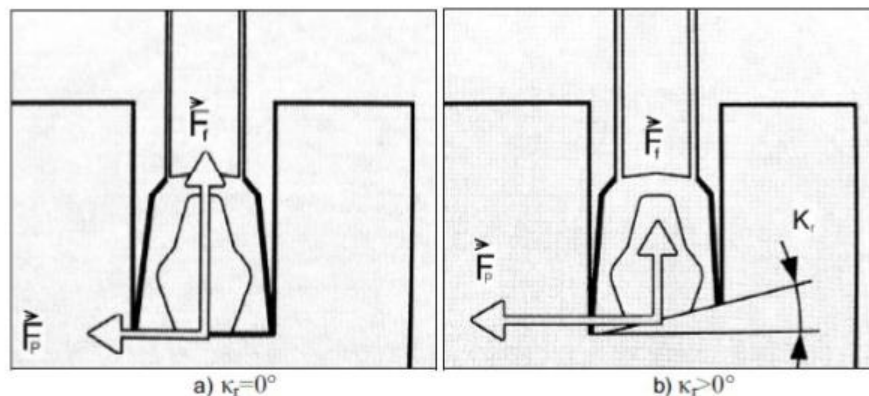
Obr. 2.4: Závislost meze pevnosti při tečení (s dobou lomu 1000 hod.) na teplotě vybraných materiálů. [19]

Pro vysoce teplotně namáhané součásti, jako jsou například lopatky plynových turbín, se využívají niklové superslitiny, nebo kobaltové superslitiny, například Inconel 713lc, nebo ASTM F75. Pro středně vysoké teploty při zachování vysoké pevnosti jsou často aplikovány titanové slitiny, mezi kterými je i slitina Ti-6Al-4V. Pro práci v nízkých teplotách ve vstupním ústrojí se pak využívají vedle slitin titanu také slitiny hliníku kvůli nízké měrné hmotnosti a ceně. [18]

3 Charakteristika zapichovacího procesu

Zapichování je jednou ze soustružnických metod obrábění, při které obecně dochází k oddělování částic materiálu ve tvaru třísky břitem nástroje. K tomu je využita kombinace dvou pohybů, a to rotace obrobku a posuv nástroje směrem k ose obrobku. Používá se ke zhotovení různých druhů drážek. Drážky rozdělujeme zejména na mělké, hluboké, široké, vnější, vnitřní a čelní. Na drážky bývají zpravidla kladeny požadavky na tolerance rozměrů šířky a hloubky a také na kvalitu obrobeného povrchu. [11]

Při návrhu a hodnocení řezného procesu je důležitá znalost velikosti, směru a smyslu řezných sil a jejich změna se změnou řezných podmínek. Tato znalost dovoluje nejen jednotlivé parametry procesu optimalizovat, ale také je důležitá z pohledu předcházení kritickým situacím z hlediska bezpečnosti práce. Na celkovou řeznou sílu mají velký vliv geometrické parametry břitu zapichovacího nástroje, zejména pak úhel čela. Pozitivní úhel čela má za následek malé řezné síly, ale zároveň snižuje pevnost břitu nástroje. Na rozložení jednotlivých složek řezné síly má pak značný vliv úhel nastavení hlavního ostří. U rovných vyměnitelných břitových destiček je úhel nastavení hlavního ostří nulový (obr.3.1a). Tato realizace poskytuje stabilní břit, lepší jakost obrobeného povrchu při dodržení úzké tolerance rozměru. Při zvětšování úhlu nastavení hlavního ostří dochází ke zvyšování pasivní složky F , jak je znázorněno na obr. 3.1b a výsledná síla má snahu vytlačit vyměnitelnou břitovou destičku do boku. U velkých úhlů nastavení hlavního ostří může dojít k takovému vychýlení vyměnitelné břitové destičky, že obrobená plocha je buď konvexní, nebo konkávní. [10, 11]



Obr. 3.1: Rozložení složek řezných sil na zapichovacím noži v závislosti na úhlu nastavení hlavního ostří. [10]

3.1 Nástroje pro zapichování

Nástroje pro zapichování jsou specifické tím, že nástroj může být obklopen materiálem obrobku ze tří stran, takže řezné síly a teplo jsou soustředěny na nejslabší část břitové destičky. Břitové destičky a držáky nástrojů jsou často úzké a musí být na všech třech stranách odlehčeny, a proto neposkytují tolik podpory jako jiné typy soustružnických destiček. Pro zachování stability by poměr radiální hloubky k šířce břitové destičky měl být menší než 10. [11]

V leteckém průmyslu existuje velké množství dílů, které se vyznačují širokými drážkami nebo kapsami se složitými profily. K obrábění takovýchto dílů je zapotřebí zvolit vhodnou strategii obrábění a často je doporučeno použít řezné nástroje s kruhovou destičkou. Důvodem použití kruhových destiček je jejich schopnost měnit směr obrábění, a tím pádem

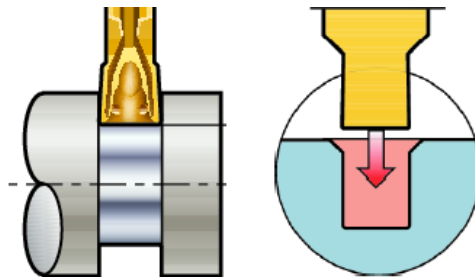
dovolují použití pokročilých strategií obrábění, jako je šikmé zahlubování nebo trochoidní soustružení. Při úhlu náběhu menším než 45° také významně snižují opotřebení destičky, a tím zvyšují produktivitu obrábění. Výhodou kruhových destiček je také jejich pevnost, která je dána vysokým poloměrem a v důsledku toho lze volit vyšší řeznou rychlost a posuv. Dalšími výhodami je možnost měnit řeznou hranu po celém obvodu destičky bez nutnosti demontáže a také její symetrický tvar, který je příznivý z pohledu rovnoměrného rozložení tepla, které při procesu obrábění absorbuje nástroj. [3, 11, 22]

3.2 Zapichovací strategie

Pro různé typy drážek jsou vhodné také různé zapichovací strategie, které se volí zejména s ohledem na rozměry vyráběné drážky. Základní strategie jsou následovné.

3.2.1 Zapichování jedním řezem

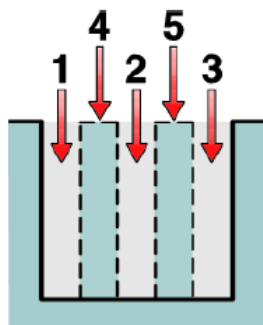
Je to nejhospodárnější a nejproduktivnější metoda řezání zápichů. Tato strategie je obecně vhodná pro drážky malých rozměrů. U některých součástí je také potřeba zkosení hran zápichu. K tomu slouží břitové destičky speciálního tvaru, tak jak je naznačeno na obr. 3.2.



Obr. 3.2: Zapichování jedním řezem. [20]

3.2.2 Vícenásobné zapichování

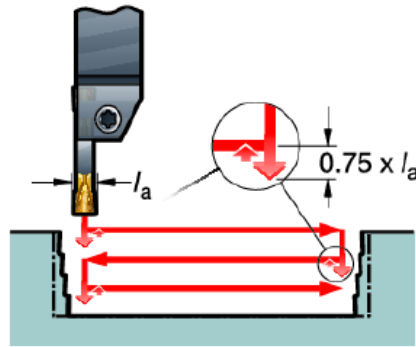
Jedná se o strategii doporučovanou pro drážky, jejichž hloubka je větší než šířka. S ohledem na ochranu rohů VBD je doporučeno nejprve zhotovit několik paralelních drážek a využít tak celou šířku břitové destičky, a poté odstranit zbytkové prstence, které musí být tenčí než šířka břitové destičky tak, jak je schematicky znázorněno na obr. 3.3.



Obr. 3.3: Vícenásobné zapichování. [20]

3.2.3 Ponorné soustružení

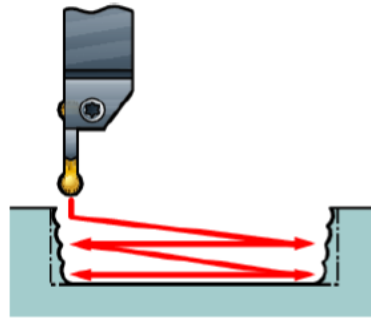
Metoda vhodná pro šikmé a mělké drážky, je znázorněná na obr. 3.4. Stejně jako u strategie šikmého zahlubování musí být použita břitová destička, která dovoluje radiální i axiální posuv. Je vhodná k hrubování drážek, jejichž šířka je větší než hloubka.



Obr. 3.4: Ponorné soustružení. [20]

3.2.4 Šikmé zahlubování

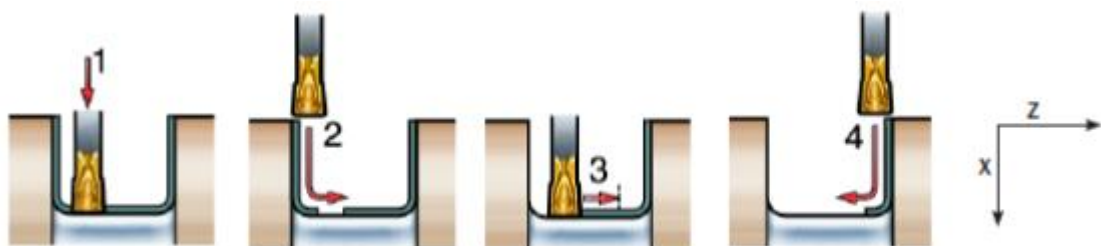
Metoda šikmého zahlubování je doporučena s ohledem na zamezení vibrací a minimalizaci radiálních sil pro štíhlé součásti. Tato metoda také nabízí lepší kontrolu utváření třísky a snižuje opotřebení ve tvaru vrubu při obrábění moderních těžkoobrobitelných materiálů. Strategie je znázorněna na obr. 3.5.



Obr. 3.5: Šikmé zahlubování. [20]

3.2.5 Dokončovací zapichování

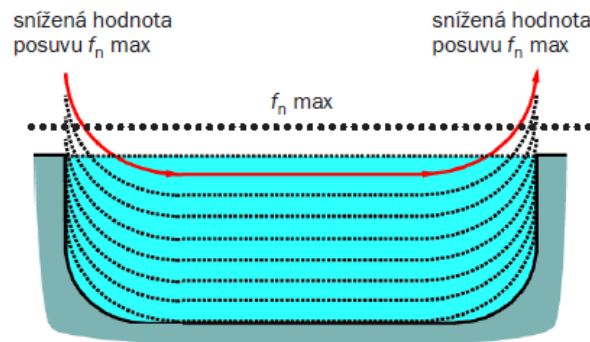
Kromě zapichování jedním řezem jsou všechny další popsané strategie hrubovací, proto po nich musí vždy následovat dokončení. Při dokončovací operaci je třeba dbát zvýšené pozornosti při obrábění poloměru rohu na dně drážky. Přestože VBD vytváří konečný tvar poloměru, většina pohybů se odehrává ve směru osy Z. Z tohoto důvodu hlavní břit odebírá velmi tenkou třísku, což může mít za následek zvýšení tření a vznik vibrací. Proto by se měla axiální a radiální hloubka řezu pohybovat v rozmezí 0,5–1,0 mm při dodržení postupu obrábění znázorněného na obr. 3.6.



Obr. 3.6: Doporučený postup při dokončovací operaci při obrábění zápichů. [20]

3.2.6 Trochoidní soustružení

Protože se v praxi běžně objevují strojní součásti z těžkoobrobitelných materiálů, které se vyznačují širokými drážkami nebo kapsami se složitými profily, používají se také speciální strategie obrábění, jako je trochoidní soustružení. Pro tuto strategii je doporučeno použití kruhových břitových destiček, protože jsou schopny radiálního i axiálního posuvu. Při této strategii jsou používány vysoké hodnoty posuvu při malé hodnotě hloubky řezu, které se mění v průběhu obrábění v závislosti na dráze nástroje. Z pohledu narůstajícího opásání břitové destičky při obrábění rádiusů je nutné v těchto místech snížit posuv, aby se snížil tlak působící na břitovou destičku. Příliš malý posuv na druhou stranu zvyšuje riziko vzniku vibrací, a proto platí doporučení, aby rádius kruhové břitové destičky byl co nejmenší, minimálně však musí být menší alespoň o 150 % než průměr vytvářeného profilu. V lineární části řezu je pak doporučeno nastavit posuvovou rychlost na zvolenou maximální hodnotu tak, jak je zobrazeno na obr. 3.7. Příznivým účinkem této metody je významné snížení opotřebení nástroje vlivem malého úhlu náběhu, který je zpravidla menší než 45° . Tímto způsobem se zvyšuje spolehlivost a životnost nástroje, a tím pádem také produktivita. Strategie trochoidního soustružení je znázorněna na obr. 3.7. [3, 20, 21]



Obr. 3.7: Trochoidní soustružení. [20]

3.2.7 Vnitřní zapichování

Řada součástí je také opatřena otvory s vnitřními drážkami, přičemž jsou vnitřní zápichy často situovány v blízkosti okraje obrobku. Nejsou však výjimkou součásti s drážkami nebo kapsami hluboko uvnitř otvoru. Nejběžnější metodou řezání vnitřních zápichů je radiální zapichování. S ohledem na danou drážku lze dále použít také vícenásobné zapichování, ponorné či trochoidní soustružení. Hlavním problémem je zde oproti vnějšímu zapichování odvádění třísek z místa řezu a v některých případech velké vyložení nástroje. Existuje řada doporučení, jak problémům spojených s těmito situacemi předejít. Z pohledu zlepšení odchodu třísek z místa řezu je to konkrétně zvýšení průtoku řezné kapaliny, změna směru obrábění od dna díry k jejímu ústí, zmenšením těla nástroje, popřípadě použití menší vyvrtávací tyče, což ale způsobí snížení tuhosti nástrojové soustavy. Pro nejlepší kontrolu třísek při dosažení maximální stability je pak doporučeno použití ponorného soustružení. Při velkém vyložení lze snížit řezné síly použitím užších břitových destiček a zmenšením jejich poloměru zaoblení rohů. [10, 20]

4 Návrh variant chladicího systému a jejich funkční řešení

Oproti předchozí diplomové práci, ve které byl výchozím nástrojem vnější soustružnický neutrální nůž s označením C5 SRDCN-12HPA, je vstupním nástrojem pro tuto práci vnitřní zapichovací soustružnický pravý nůž s označením SL70-SRDCA-50-12HP. Oba nástroje mají podobnou konstrukci z hlediska přívodu řezné kapaliny vnitřkem těla nástroje k VBD, jehož vývod je realizován prostřednictvím třech válcových děr, jak je patrné z obr. 4.1. Stejně tak zde není realizován přívod řezné kapaliny ze spodní strany, respektive pro chlazení hřbetu VBD.



Obr. 4.1: Soustružnický nůž SL70-SRDCA-50-12HP. [23]

Označení nástrojového držáku je v souladu s ISO a je znázorněno na obr. 4.2, kde je:

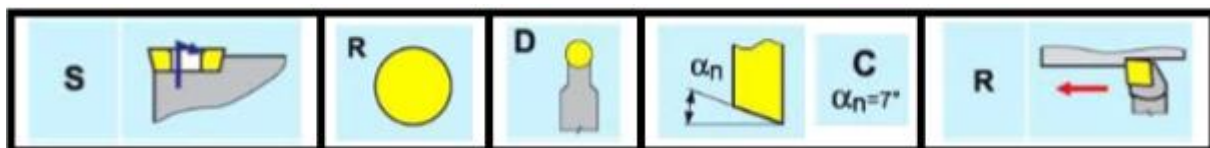
S – upnutí VBD středovým šroubem,

R – kruhová VBD,

D – tvar nože a úhel nastavení,

C – úhel hřbetu 7° ,

R – směr řezu vpravo.

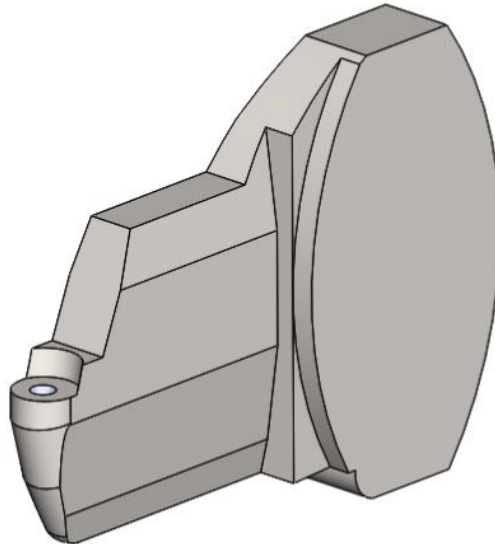


Obr. 4.2: Označení nástrojového držáku dle ISO.

Jak již bylo zmíněno, cílem práce je navrhnout a následně realizovat přívod chladicí kapaliny tělem nástroje tak, aby mohl být efektivně chlazen hřbet kruhové VBD. Tělo použitého nástroje je komerčně dostupný od společnosti Sandvik Coromant. Samotný návrh řešení podléhá hned několika omezujícím parametrům. Především se jedná o malé rozměry části těla nástroje pod destičkou, minimální průměr díry, ve které může nástroj pracovat a dostatečné tloušťky stěn, které jsme schopni vyrobít v dostatečné kvalitě pomocí 3D tisku. Na základě těchto parametrů bylo navrženo několik variant, z nichž byly vybrány tři. Postup návrhu a popis jednotlivých variant je popsán v následující části kapitoly.

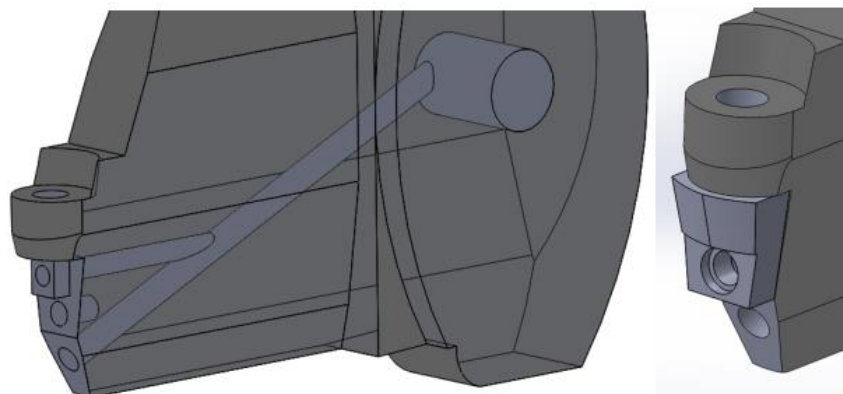
4.1 Postup návrhu

Vstupem pro realizaci konstrukčních úprav byl CAD model nástrojového držáku, který je volně dostupný na internetových stránkách výrobce. Základní model (obr. 4.1) neobsahuje vnitřní kanál pro přívod řezné kapaliny tělem nástroje, díry pro upínací šrouby ani drážkování na upínací ploše.



Obr. 4.3: Základní CAD model nástrojového držáku SL70-SRDCR-50-12HP.

Postup návrhu je inspirován řešením, které ve své práci realizoval Šindelář, tedy přívod řezné kapaliny tělem nástroje vrtanými a následně zaslepenými dírami a přesný přívod paprsků řezné kapaliny na hřbet VBD prostřednictvím upínky vytištěné na 3D tiskárně. Prostor pro uložení upínky je vytvořen pod VBD odebráním materiálu těla nástroje a upínka je k tělu připevněna šroubovým spojem. Návrh probíhal v několika etapách. Prvním řešeným problémem bylo navrhnout systém vnitřních děr tak, aby je bylo možné vyrobit bez nutnosti použití speciálního nářadí, konkrétně aby byla splněna podmínka maximálního poměru průměru vrtáku s hloubkou vrtání. Pro běžné vrtáky obecně platí, že délka vrtání by neměla být větší než desetinásobek průměru vrtáku. Důležitá byla také poloha vyústění kanálu pod VBD z důvodu ovlivnění podoby lůžka pro upínku, a tím pádem také na podobu samotné upínky. První návrh pracoval s rozmístěním kanálů, které je vidět na obrázku 4.4. Tomuto řešení bylo přizpůsobeno lůžko pro upínku a hlavní myšlenkou tohoto návrhu bylo vymezení polohy upínky pomocí materiálu těla nástroje, který by dosedl na vnitřní plochy upínky.

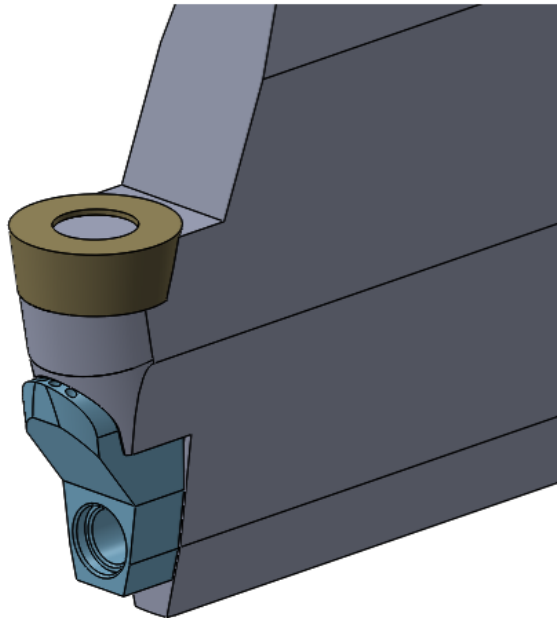


Obr. 4.4: 1. etapa návrhu systému chlazení.

Problémy tohoto řešení se objevují především na plochách vybrání upínky, protože metodou 3D tisku nelze tyto plochy vyrobit v dostatečné kvalitě tak, aby bez problému dosedly na plochy těla nástroje, a díky malým rozměrům v prostoru kolem vtokového kanálku upínky by bylo zbytečně složité jejich dodatečné obrobení. Další nevýhodou tohoto řešení jsou malé rozměry, kdy celková délka upínky je 10 mm. Na základě těchto problémů byla upravena soustava vnitřních kanálů v těle nástroje. Vrtání hlavního kanálu bylo přesunuto na protilehlou stranu, čímž vznikl větší prostor pro realizaci lůžka upínky. V návaznosti na toto řešení bylo možné zvětšit rozměry upínky, a to jak celkové délky, tak také díry pro upínací šroub a vstupního kanálku. V další části této kapitoly jsou již popsány návrhy řešení, které byly nakonec realizovány.

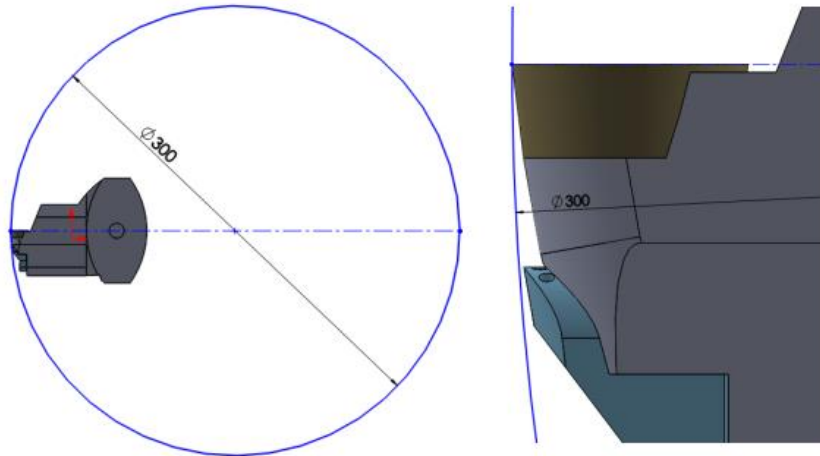
4.2 Varianta A

Tato varianta byla navržena v přímé návaznosti na výše popsaný postup. Sestava nástrojového držáku s upínkou a VBD je zobrazen na obr. 4.5.



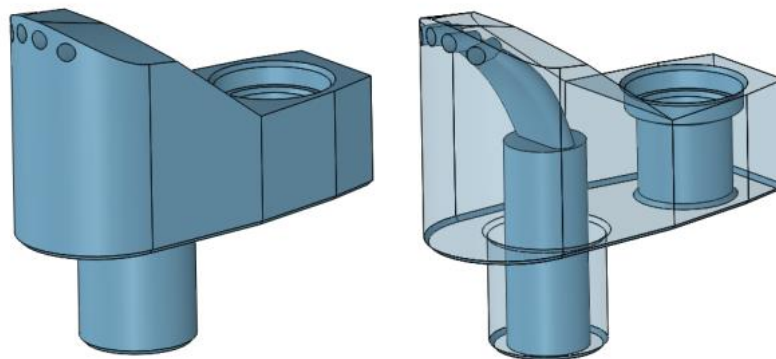
Obr. 4.5: Sestava prototypového nástroje – varianta A.

Předepsaný minimální průměr díry, ve které může původní nástroj obrábět je 150 mm. Tento průměr se logicky přidáním upínky zvětší, protože není konstrukčně možné přivést řeznou kapalinu na hřbet VBD, aniž by materiál upínky nepřesahoval původní obrys nástroje. Při návrhu byla snaha navrhnout zmíněný přesah co nejmenší, aby nárůst hodnoty minimálního pracovního průměru byl co nejmenší. Z tohoto pohledu byly výstupní kanálky situovány co nejbližší hraně lůžka s co nejmenším možným průměrem kanálku a tloušťkou vrchní stěny. Výsledný minimální pracovní průměr byl stanoven na hodnotu 300 mm. Na obr. 4.6 je naznačeno, jak proběhla kontrola této skutečnosti. Tento postup byl proveden u všech variant a hodnota minimálního pracovního průměru je u všech tří variant shodná.



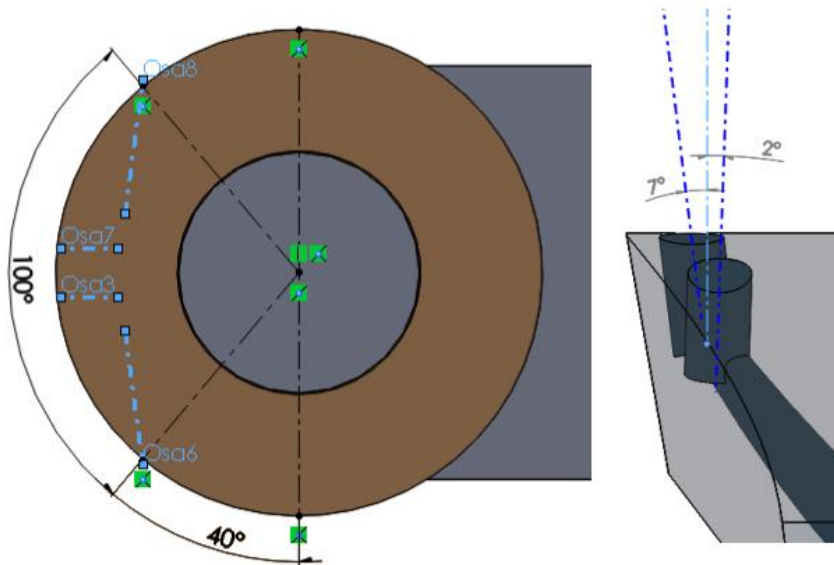
Obr. 4.6: Kontrola minimálního pracovního průměru.

4.2.1 Upínka



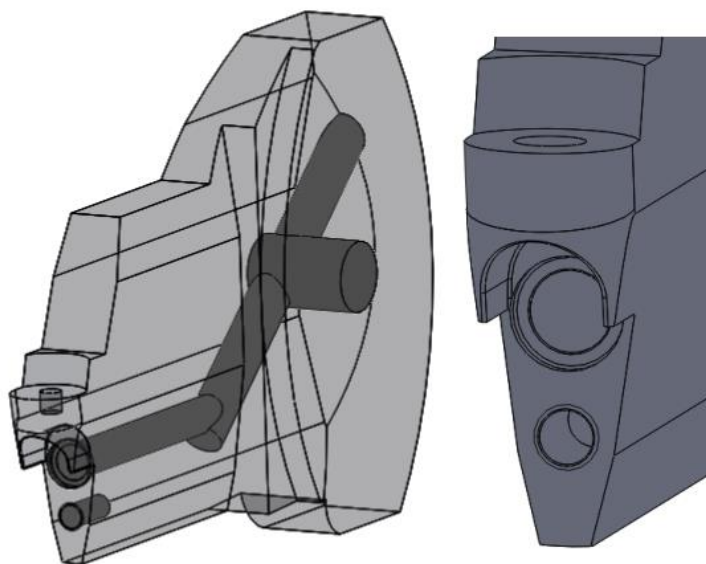
Obr. 4.7: Upínka – varianta A.

Upínka byla navržena s ohledem na tvar a rozměry původní části těla nože. Maximální výška od dosedací plochy je 10,4 mm a je v souladu s podmínkou minimální tloušťky stěny a minimálního obráběného průměru tak, jak bylo popsáno výše. V půdorysu pak kopíruje tvar stávajícího těla nože, při maximální délce 16,6 mm. Přívod řezné kapaliny je z pohledu uspořádání situován v přední části nástavce před dírou pro uchycení šroubem. Průměr díry pro šroub je 4 mm. Kanál pro přívod řezné kapaliny má na vstupu průměr 3,5 mm a průřez se směrem k vývodovým kanálkům zmenšuje až na konečný průměr jednotlivého vývodového kanálku 0,8 mm. Vývodové kanálky mají pravidelné rozestupy a jsou skloněny tak, aby proud kapaliny směřoval co nejbližší břitu kruhové VBD. Celkový pohled na provedení upínky je na obr. 4.7. Sklon a směr trysek je znázorněn na obr. 4.8, v jeho levé části je pak znázorněna kruhová výseč na VBD velká přibližně 100° , na kterou bude řezná kapalina dopadat.



Obr. 4.8: Nasměrování trysek upínky.

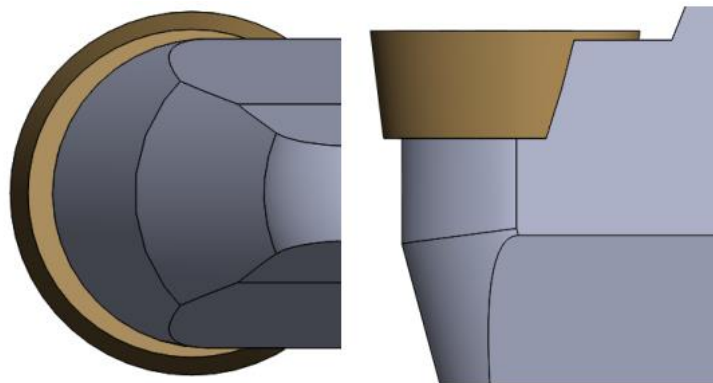
4.2.2 Tělo



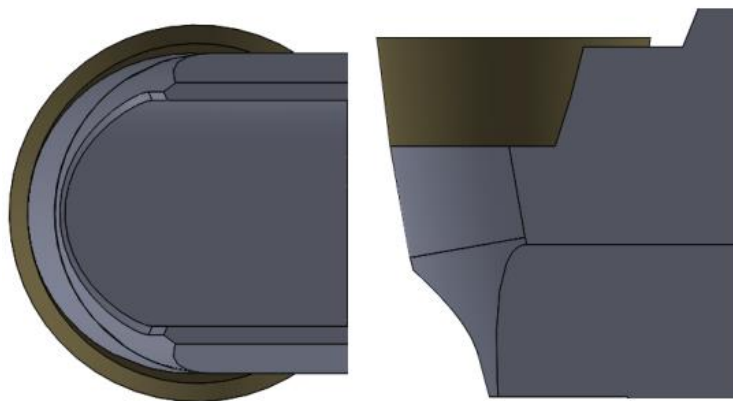
Obr. 4.9: Nástrojový držák – varianta A.

Jak již bylo popsáno, pod VBD byl odebrán materiál, díky čemu vznikl prostor pro umístění upínky. Provedené konstrukční úpravy jsou zobrazeny na obr. 4.9. Byla snaha upínku umístit co nejbližší k VBD, avšak s přihlédnutím na to, aby mezi nástavcem a VBD zbylo takové množství materiálu, které zaručí dostatečnou pevnost těla nože při zatížení. Oproti původnímu provedení byl upraven tvar části mezi upínkou a VBD za účelem minimalizace plochy přilehlého čela VBD přesahující přes tělo nože vlivem rozdílného tvaru VBD a těla. Plocha VBD přesahující přes tělo nástroje je nežádoucí z toho důvodu, že při dopadu proudu řezné kapaliny na tuto plochu by mohlo dojít k nepříznivému ovlivnění směru a rychlosti proudění. Provedení úpravy je patrné z obr. 4.10 a obr. 4.11. Tělem nože je veden přívod řezné kapaliny, který je realizován dvěma dírami, jejichž průměr se směrem k vyústění zmenšuje. Délka a průměry děr byly navrženy tak, aby je bylo možné vyvrtat bez nutnosti použití speciálního nářadí. Na díru průměru 6 mm o délce 55 mm navazuje díra průměru 5 mm a délce

40 mm. Na vyústění kanálu je vytvořeno zahlužení pro uložení těsnícího O-kroužku. Ve spodní části je pak připravena závitová díra pro šroub M4.



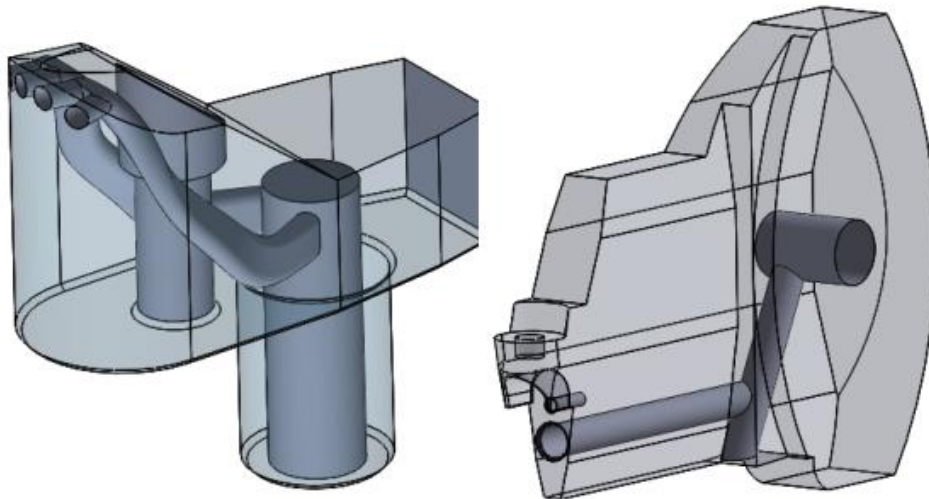
Obr. 4.10: Nástrojový držák bez úpravy lůžka VBD.



Obr. 4.11: Nástrojový držák s úpravou lůžka VBD.

4.3 Varianta B

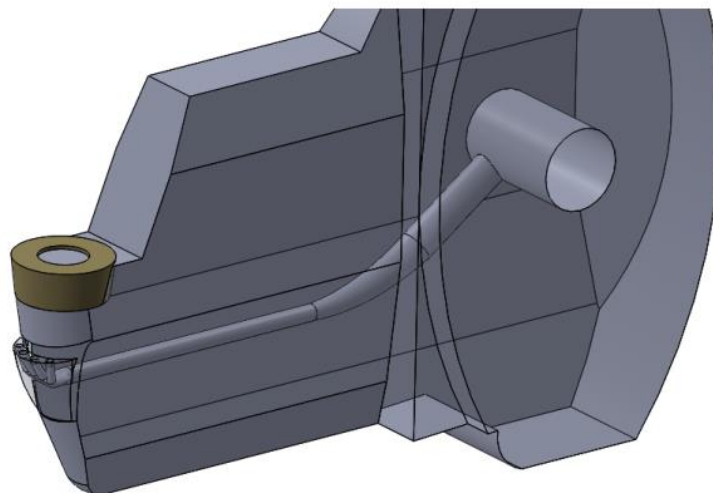
Rozdíl oproti první variantě je v konstrukci upínky z pohledu umístění vedení řezné kapaliny a díry pro uchycení. K tomuto návrhu došlo kvůli úvaze, že výměnou místa díry s přívodovým kanálem dojde k příznivějšímu silovému působení na uložení upínky v lůžku. Vlivem silového působení tlaku proudu řezné kapaliny na nástavec, v případě, že je přívod situován na konci nástavce za dírou pro uchycení, dojde ke vtlačování přední strany nástavce směrem do těla nástroje. V opačném případě (u varianty A) bude výsledný směr síly od nástroje, což může způsobit nadzvednutí nástavce od dosedací plochy, a tím pádem ke změně směru nastavení vývodových kanálků nástroje. V návaznosti na změny upínky bylo nutné změnit provedení vedení řezné kapaliny tělem nástroje, které je opět realizováno dvěma dírami, tentokrát však se stejným průměrem 5 mm o délce 28 mm, respektive 45 mm. Ostatní konstrukční úpravy vzhledem k původnímu provedení jsou stejné jako u varianty A. Provedení upínky a držáku je zobrazeno na obr. 4.12.



Obr. 4.12: Upínka a nástrojový držák – varianta B.

4.4 Varianta C

Tato varianta upouští od řešení prostřednictvím odebráním materiálu původního těla nástroje a následnému přidání materiálu vytištěnou upínkou. Celé tělo nástroje i s vedením a vyústěním rezné kapaliny je totiž navrženo jako jeden kus, kdy se počítá s jeho výrobou metodou 3D tisku. Sestava nástroje je zobrazena na obr. 4.13. Použitím této technologie odpadá několik problémů, jako je například vrtání děr do těla a s tím spojené nutnosti zaslepování vzniklých děr a s podmínkou hloubky díry v poměru k průměru nástroje. Odpadne také nutnost těsnění spojení nástavce a těla. Dále se sníží počet míst, kde je potřeba ohlídat minimální tloušťku stěny, kterou je schopna použítá tiskárna vytisknout v dostatečné kvalitě.



Obr. 4.13: Sestava prototypového nástroje – Varianta C.

4.5 Výroba nástrojového držáku

Z důvodu poruchy vřetena stroje na katedře technologie obrábění, na kterém mělo probíhat experimentální obrábění, bylo hledáno náhradní řešení realizace experimentu. V důsledku značného zdržení byl pro účely realizace experimentu v této práci vyroben jen nástroj variantního provedení A.

Pro výrobu nástrojového držáku bylo nejprve nutné zkompletovat CAD model. Byly tedy doplněny díry pro upínací šrouby a také drážkování na upínací ploše. Drážkování bylo naskenováno přímo z komerčně dostupného nástrojového držáku prostřednictvím digitálního mikroskopu Keyence VHX-6000. Důvodem vytvoření stejného rozhraní je kompatibilita a očekávané nasazení nástrojů do reálné výroby. Z kompletního CAD modelu byl pak následně vytvořen NC program prostřednictvím softwaru SolidCam.

Samotná výroba proběhla na stroji DMG eVo 40 linear v několika krocích. Jako polotovár byla použita nástrojová ocel dle ČSN 41 9573. Prvním krokem bylo frézování upínací části nástroje, kde byly nejdůležitějšími prvky drážkování a kruhový otvor pro přívod kapaliny. Tento otvor zároveň slouží k vystředění nástroje na upínači a bylo proto zapotřebí věnovat mu při výrobě dostatečnou pozornost. Dalším krokem bylo vytvoření a následná výroba upínacího přípravku. K výrobě přípravku bylo přistoupeno z důvodu tvarové složitosti dílu. V posledním kroku byly obrobena zbylé plochy nástroje včetně lůžka pro upínku nebo vnitřní kanály pro přívod rezné kapaliny.

Výroba upínky

Výroba upínky variantního provedení A proběhla na pracovišti KTO na 3D kovové tiskárně EOS M100. Materiálem tisku byla ocel s označením AISI 316L. Tisk byl realizován v ochranné atmosféře a dočištění tisku proběhlo ručním dobroušením.

5 Návrh, realizace a vyhodnocení experimentálního měření vybraných variant

Smyslem navrženého experimentu je porovnání trvanlivosti prototypového nástroje s nástrojem konvenčním. Porovnání s konvenčním nástrojem je zvoleno z důvodu očekávaného nasazení prototypového nástroje v reálné výrobě firmou PCC. Jak již bylo zmíněno v podkapitole 4.5, v důsledku poruchy vřetena stroje, na kterém měl být experiment realizován, byl plán experimentu upraven pro jiný stroj. Místo původně zvoleného stroje (CTX Beta 1250 TC 4A) byl vybrán stroj MAZAK QUICK TURN NEXUS 250-II MY. Tímto náhradním řešením byly ovlivněny i samotné podmínky pro realizaci experimentu. Nástroj byl původně navržen zejména s ohledem na parametry chlazení stroje, který disponuje tlakem a 100 barů a průtokem 1 l/min. Vzhledem k tomu, že náhradní stroj je sice vhodný z hlediska tuhosti, ale chladič agregát disponuje tlakem pouze 12 barů, je možné očekávat horší výsledky trvanlivosti řezné hrany.

K již zmíněným problémům dále nebylo možné provést experiment dle původního plánu, kdy byla zamýšlena strategie kapsování obdobně jako nástroj reálně pracuje ve společnosti PCC. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno ke zjednodušenému testování popsanému dále v této kapitole.

Pro původní experiment také bylo v plánu vyrobit všechny navržené varianty nástrojů a ty pak jednotlivě porovnat s nástrojem původním v provedení tak, jak je k dostání přímo od výrobce. Jako hlavní sledovaný parametr byla zamýšlena hodnota opotřebení hřbetu destičky VB, respektive čas, za který hodnota opotřebení dosáhne právě předem zvolené hodnoty VB_{krit} .

Reálný experiment byl tedy zúžen na porovnání životnosti břitové destičky při použití prototypového nástroje variantního provedení A, popsaného v podkapitole č. 4.2, s životností řezné destičky při použití konvenčního nástroje. Celkem proběhly 2 testy. V prvním testu, vlivem zvolených řezných podmínek, nedosahoval růst opotřebení hřbetu VB požadovaných hodnot, a proto byl zařazen druhý test se zvýšenou řeznou rychlostí.

5.1 Podmínky v PCC

Výchozí parametry pro realizaci experimentu byly inspirovány reálnými podmínkami v provozu firmy PCC.

5.1.1 Obráběný díl

Ve firmě PCC je nástrojem SL70-SRDCR-50-12HP, který je modifikován v této práci, obráběna vnitřní kapsa na dílu L04860PRE-SONIC-NEO IBR3 (obr. 5.1). Jedná se o rotační součást, která je součástí leteckého proudového motoru. Polotovarem je pak odlitek z titanové slitiny Ti-6Al-4V vyrobený na zakázku.

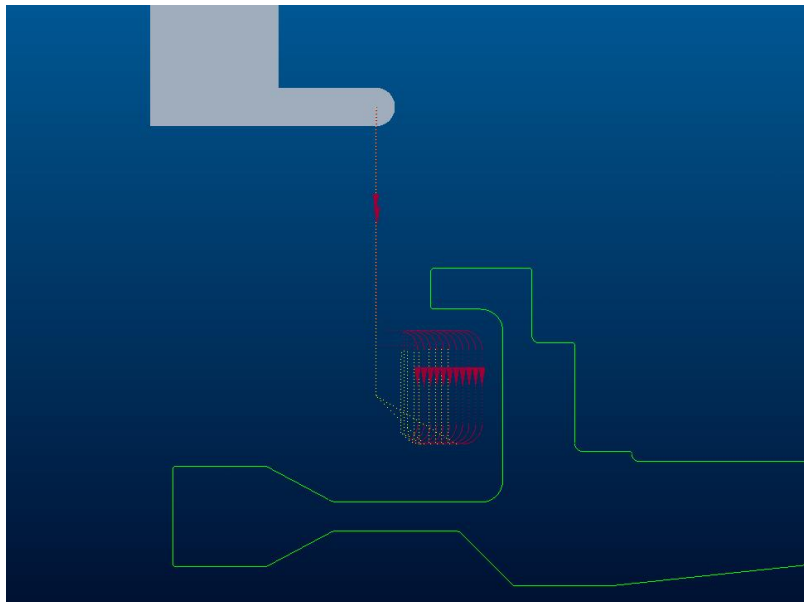
L04860PRE-SONIC - NEO IBR3



Obr. 5.1: Obráběný díl L04860PRE-SONIC-NEO IBR3.

5.1.2 Strategie obrábění

Pro výrobu této vnitřní kapsy je zvolena strategie trochoidního soustružení, která je popsána v podkapitole 3. 2. 6. Jednotlivé dráhy nástroje při obrábění jsou naznačeny na obr. 5.2. Výroba této součásti probíhá na soustružnickém obráběcím centru se svislou osou obrábění.



Obr. 5.2: Dráhy nástroje při obrábění vnitřní kapsy.

5.1.3 Řezné podmínky

Hodnoty řezných podmínek používaných ve firmě PCC jsou uvedeny v tabulce 5.1.

Tab. 5.1: Řezné podmínky v PCC.

Řezné podmínky v PCC		
Parametr	Hodnota	Jednotka
v_c	75	m/min
f	0,25	mm/ot.
a_p	2,7	mm
t	22	min
koncentrace chladicí kapaliny	5	%

5.2 Popis experimentu

Cílem experimentu bylo porovnat životnosti dvou různých nástrojů při obrábění dílu z materiálu Ti-6Al-4V, konkrétně při obrábění kruhové tyče stejnou obráběcí strategií

a při stejných hodnotách nastavení řezných podmínek. Prvním nástrojem byl komerčně dostupný nástroj používaný v provozu firmy PCC, jehož provedení dovoluje během procesu obrábění chladit čelo VBD. Druhým nástrojem byl prototypový nástroj vyrobený v RTI, který je modifikací nástroje prvního a jeho provedení dovoluje během obrábění chladit vedle čela VBD také její hřbet. Pro účely vyhodnocení experimentu byl zvolen jako zkoumaný parametr maximální opotřebení hřbetu nástroje VB_{max} . Opotřebení hřbetu jako omezující parametr životnosti nástroje bylo zvoleno na základě zkušeností, že při obrábění tohoto materiálu zvolenou strategií je téměř veškeré opotřebení soustředěno právě na hřbet, nikoliv na čelo VBD. Pro účely vyhodnocení jednotlivých testů byla následně zvolena kritériální hodnota opotřebení hřbetu VB_{krit} , při které bylo testování zastaveno. Konkrétní hodnota VB_{krit} byla zvolena s ohledem na velikost opotřebení hřbetu VBD, do které je nástroj schopen zaručit spolehlivý proces obrábění. Pro měření velikosti opotřebení byl použit optický mikroskop VHX-6000. Životnost jednotlivých nástrojů byla pak vyhodnocena z času, při kterém bylo dosaženo hodnoty VB_{krit} . Zaznamenaná data dále znázorňují časový průběh opotřebení hřbetu VBD v závislosti na různém typu chlazení. Vedle opotřebení hřbetu byly také měřeny parametry kvality povrchu R_a a R_z . Vyhodnocena byla závislost těchto parametrů na opotřebení VBD. Tyto informace jsou v této práci uvedeny jako doprovodný parametr procesu obrábění a byly použity k posouzení stability řezného procesu.

Obráběný díl byl upnut v soustružnickém centru do univerzálního sklíčidla s tvrdými čelistmi a z druhé strany přitlačen otočným hrotem. Z celkové délky obrobku 500 mm byla odečtena bezpečná vzdálenost od čelistí sklíčidla a byla stanovena použitelná délka soustružnického přejezdu 490 mm. Tato délka pak byla rozdělena na 2 stejné úseky dlouhé 245 mm, na kterých byly realizovány jednotlivé přejezdy. Na obrázku 5.3 je zachyceno upnutí obrobku v prostoru stroje před obráběním konvenčním nástrojem.



Obr. 5.3: Upnutí obrobku v prostoru stroje.

Řezné podmínky pro první test byly převzaty od firmy PCC, s tím rozdílem, že byla snížena hodnota hloubky řezu z 2,7 mm na 1 mm. Důvodem pro tuto změnu bylo za prvé ekonomické hledisko, protože nákupní cena polotovaru z dané titanové slitiny je vysoká a za druhé snížení vlivu změny obráběného průměru na průběh opotřebení VBD.

Protože při prvním testu nebylo dosaženo kritériálních hodnot opotřebení hřbetu VB_{krit} po předem stanoveném počtu přejezdů, byl zařazen test druhý se zvýšenou řeznou rychlostí. Tato změna byla provedena na základě předpokladu, že vyšší řezná rychlost způsobí větší množství tepla, které je z místa řezu odváděno především prostřednictvím nástroje a tím pádem se dynamika růstu opotřebení hřbetu zesílí.

5.3 Podmínky experimentu

5.3.1 Použité nástroje

1. nástroj: konvenční nástroj – SL70-SRDCR-50-12HP.
2. nástroj: prototypový nástroj – upravený nástroj SL70-SRDCR-50-12HP.

5.3.2 Použitá vyměnitelná břitová destička

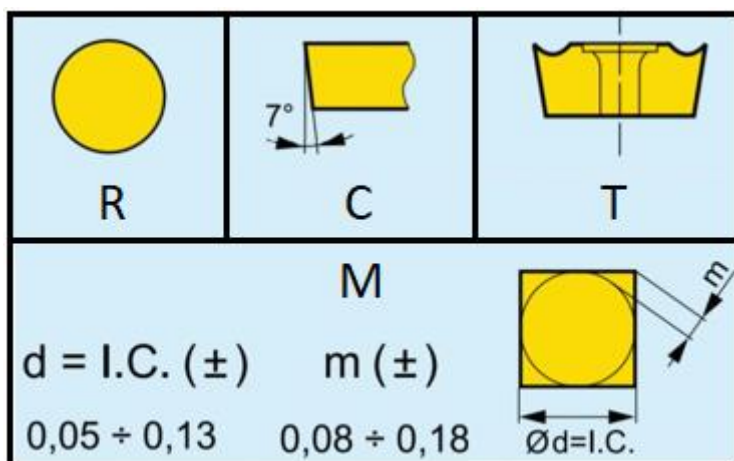
V obou případech byla použita stejná VBD, konkrétně RCMT 1204M0 – MK od společnosti ISCAR, která je v provozu firmy PCC běžně používána. Jedná se o kruhovou VBD, jejíž konkrétní specifikace dle značení ISO je uvedena na obrázku č. 5.4, kde:

R – kruhový tvar,

C – úhel hřbetu 7° ,

M – tolerance,

T – upnutí VBD pomocí šroubu středem destičky.



Obr. 5.4: Specifikace použité VBD dle ISO značení.

Materiálem použité VBD je slinutý karbid. Pod písmeny MK na konci označení se pak skrývá specifikace geometrie utvářeče třísky. Popis této konkrétní geometrie od firmy ISCAR není veřejně dostupný a v této práci proto není uveden.

5.3.3 Strojní vybavení a další zařízení použité při experimentu

MAZAK QUICK TURN NEXUS 250-II MY

Jedná se o soustružnické obráběcí centrum s vodorovnou osou obrábění, které bylo použito pro samotný experiment.

VHX-6000

Optický mikroskop od výrobce Keyence použitý pro měření opotřebení na hřbetu VBD. Tento mikroskop byl použit kvůli své schopnosti zaostřit obraz ve v různých hloubkách, což je při měření opotřebení na kruhových VBD nezbytné.

SURTRONIC DUO

Přenosný přístroj pro kontrolu drsnosti povrchu s diamantovým hrotem.

Specifikace jednotlivých strojů a přístrojů jsou uvedeny v přílohách této práce.

5.3.4 Strategie obrábění

S ohledem na podmínky a strojní vybavení v RTI bylo pro účely experimentu zvoleno vnější podélné soustružení. Polotovarem byla zvolena kruhová tyč o průměru 125 mm a délce 500 mm z titanové slitiny Ti-6Al-4V.

5.3.5 Řezné podmínky

Jak již bylo zmíněno, nastavení řezných podmínek pro experiment bylo inspirováno řeznými podmínkami firmy PCC. Konkrétní nastavení řezných podmínek pro jednotlivé testy jsou uvedeny v tabulkách 5.2 a 5.3.

Test 1

Tab. 5.2: Řezné podmínky Test 1.

Řezné podmínky Test 1		
Parametr	Hodnota	Jednotka
v_c	75	m/min
f	0,25	mm/ot.
a_p	1	mm
tlak chladící kapaliny	12	bar
délka jednoho přejezdu	245	mm

Test 2

Tab. 5.3: Řezné podmínky Test 2.

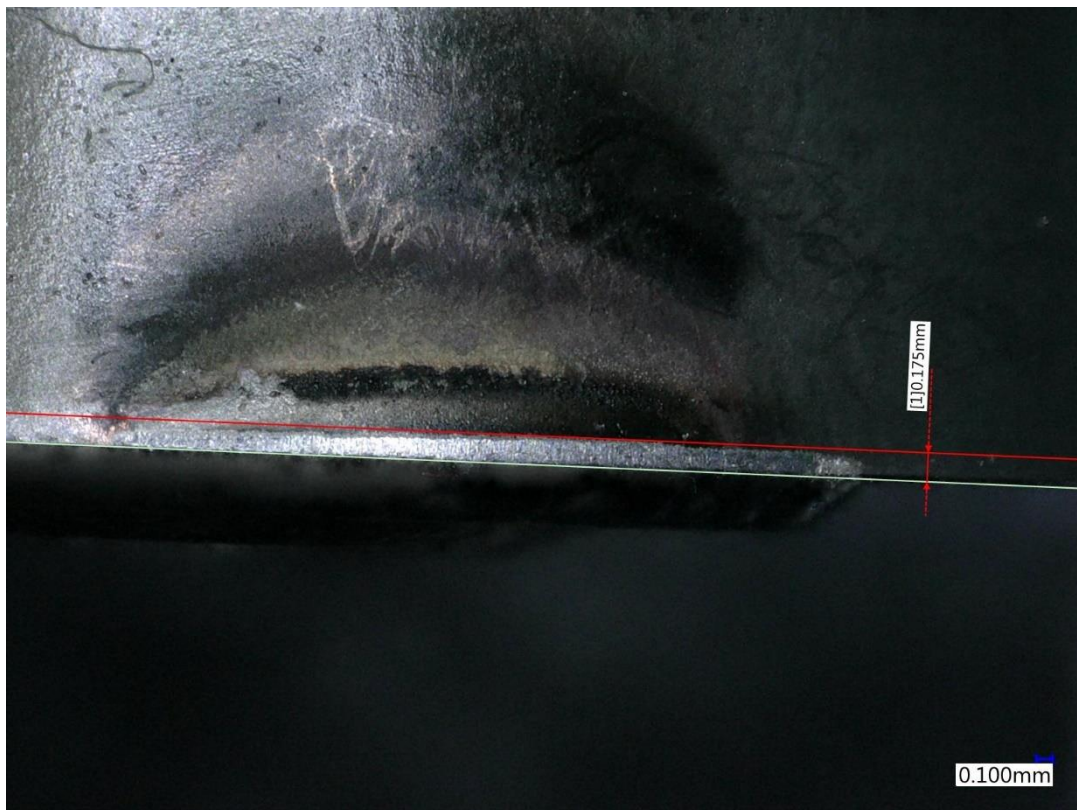
Řezné podmínky Test 2		
Parametr	Hodnota	Jednotka
v_c	100	m/min
f	0,25	mm/ot.
a_p	1	mm
tlak chladící kapaliny	12	bar
délka jednoho přejezdu	245	mm

5.4 Předpokládaný průběh experimentu

Na základě výsledků zjištěných v práci Ondřeje Šindeláře z minulého roku a obecných doporučení výrobců řezných destiček pro obrábění titanových slitin, lze předpokládat, že prototypový nástroj vyrobený v RTI dosáhne delší životnosti díky kombinovanému chlazení čela a hřbetu jeho VBD. U konvenčního nástroje lze s přibývajícím počtem přejezdů tedy předpokládat strmější růst opotřebení hřbetu VBD, a tím pádem rychlejšího dosažení zvolené hodnoty VB_{krit} .

5.5 Průběh experimentu

Samotné testování probíhalo v několika krocích. Nejprve byl do stroje upnut obrobek s nástrojem a nastaveny řezné podmínky odpovídající aktuálnímu testu. Poté bylo spuštěno samotné obrábění s délkou přejezdu 245 mm. Po obrobení této dráhy byl stroj zastaven a nástroj vyjmut z upínače. Nástroj byl následně umístěn do přípravku na stole optického mikroskopu, kde proběhlo změření hodnoty opotřebení hřbetu VB. Příklad měření opotřebení hřbetu VB pomocí optického mikroskopu je znázorněn na obrázku č. 5.5. Takto změřené hodnoty byly zaznamenávány a uchovány pro další zpracování. V této fázi byly také změřeny a zaznamenány hodnoty parametrů kvality povrchu R_a a R_z , a to v oblasti na začátku řezu a také na konci řezu. Tyto hodnoty pak byly pro vyhodnocování zprůměrovány. Uvedené kroky byly opakovány do té doby, než hodnota VB dosáhla předem zvolené hodnoty VB_{krit} . Poté byly zaznamenané hodnoty vyhodnoceny a bylo rozhodnuto o dalším opakování.



Obr. 5.5: Měření parametru opotřebení hřbetu VB.

5.5.1 Test 1

Pro Test 1 byla zvolena kritériální hodnota opotřebení hřbetu $VB_{krit} = 0,4$ mm. Jednotlivé hodnoty byly zaznamenávány a jsou uvedeny v tabulce 5.6 pro konvenční nástroj

a v tabulce 5.7 pro prototypový nástroj. Další hodnoty v tabulce byly pro účely vyhodnocení dopočteny. Z časových a ekonomických důvodů byla také pro jednotlivé testy zvolena maximální hodnota počtu přejezdů. Konkrétně bylo stanoveno, že pokud po 6. přejezdu nebude patrné výrazné přiblížení ke kritériální hodnotě opotřebení, bude daný test zastaven.

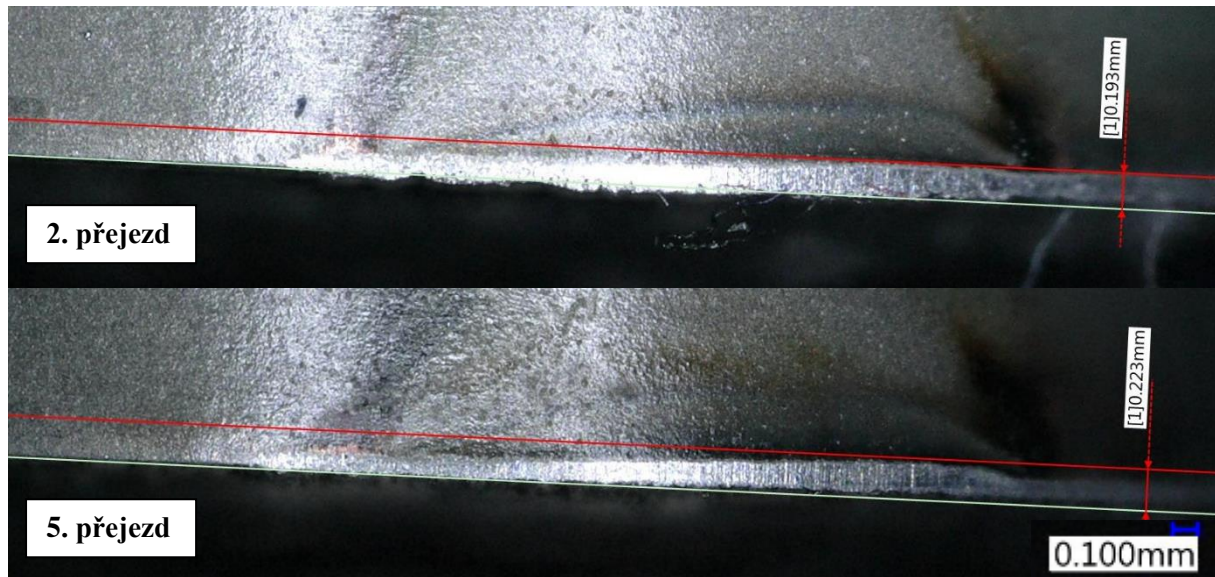
Tab. 5.4: Naměřené a dopočtené hodnoty – Test 1 – konvenční nástroj.

Nástroj bez chlazení hřbetu							
Veličina	Jednotka						
Přejezd	-	1	2	3	4	5	6
D	mm	119	117	115	111	109	107
n	ot./min	200,621	272,068	276,799	286,774	292,036	297,495
t	min	4,885	8,487	12,027	15,445	18,800	22,095
VB	mm	0,193	0,213	0,223	0,247	0,263	0,290
Ra1	μm	0,29	0,34	0,30	0,44	0,39	0,35
Ra2	μm	0,37	0,34	0,33	0,36	0,34	0,30
Ra	μm	0,33	0,34	0,32	0,40	0,37	0,33
Rz1	μm	1,80	1,80	1,80	2,20	2,00	1,80
Rz2	μm	2,00	1,80	1,80	2,00	1,90	1,70
Rz	μm	1,90	1,80	1,80	2,10	1,95	1,75

Tab. 5.5: Naměřené a dopočtené hodnoty – Test 1 – prototypový nástroj.

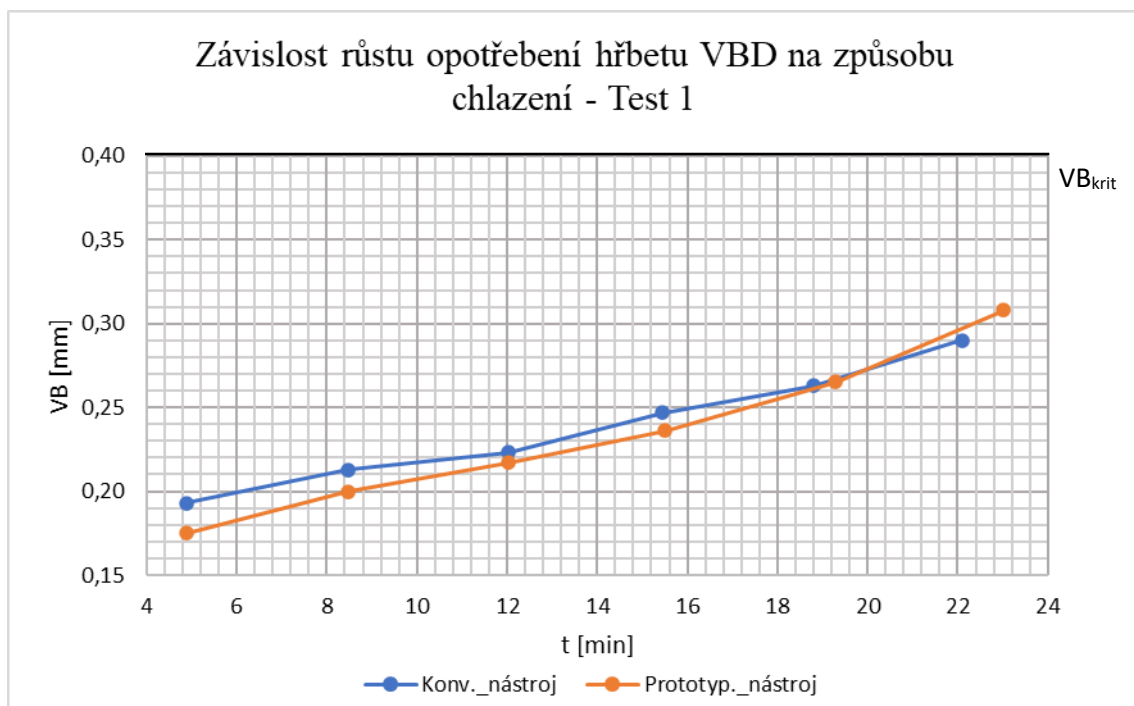
Nástroj s chlazením hřbetu							
Veličina	Jednotka						
Přejezd	-	1	2	3	4	5	6
D	mm	119	117	115	113	123	121
n	ot./min	200,621	272,068	276,799	281,698	258,796	263,074
t	min	4,885	8,487	12,027	15,506	19,293	23,018
VB	mm	0,175	0,200	0,217	0,236	0,265	0,308
Ra1	μm	0,45	0,30	0,33	0,41	0,29	0,31
Ra2	μm	0,31	0,30	0,37	0,41	0,42	0,34
Ra	μm	0,38	0,30	0,35	0,41	0,36	0,33
Rz1	μm	2,20	1,60	1,80	2,20	1,60	1,70
Rz2	μm	1,80	1,60	1,90	2,20	2,00	1,90
Rz	μm	2,00	1,60	1,85	2,20	1,80	1,80

Na obrázku 5.6 jsou znázorněny fotky z optického mikroskopu, na kterých probíhalo měření přírůstků VB po některých vybraných přejezdech u konvenčního nástroje.



Obr. 5.6: Měření parametru opotřebení hřbetu VB u konvenčního nástroje.

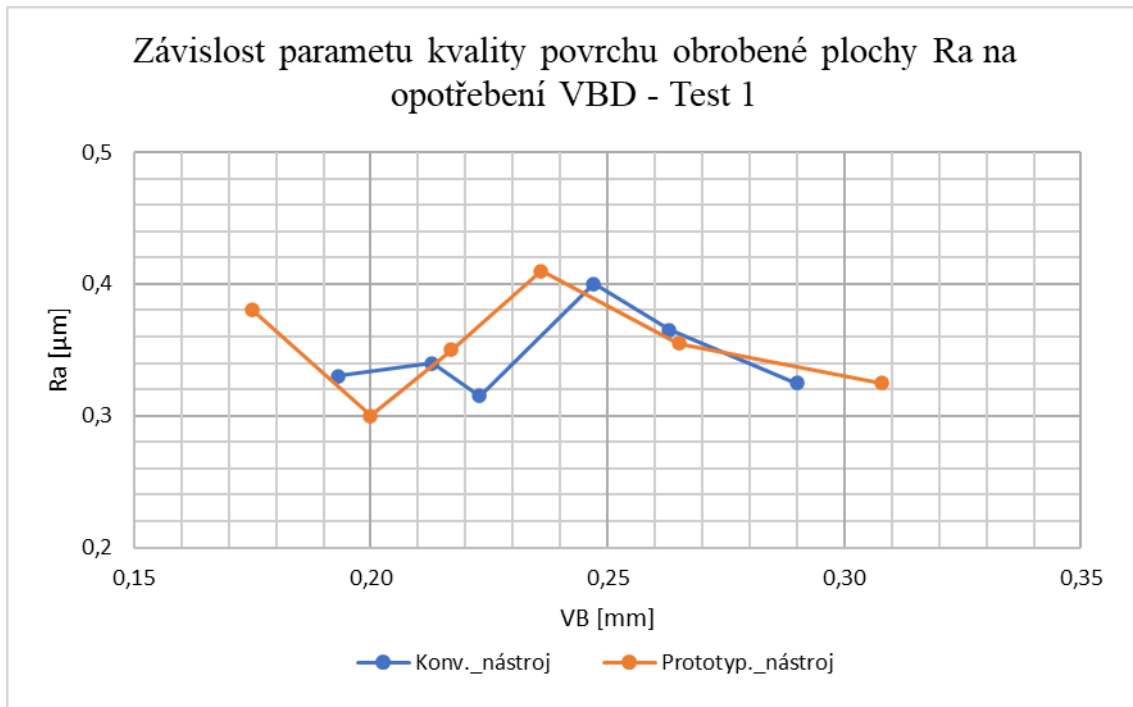
Po dokončení měření obou variant byly hodnoty opotřebení hřbetu VB zaneseny do grafu 5.1 v závislosti na čase břitové destičky v řezu.



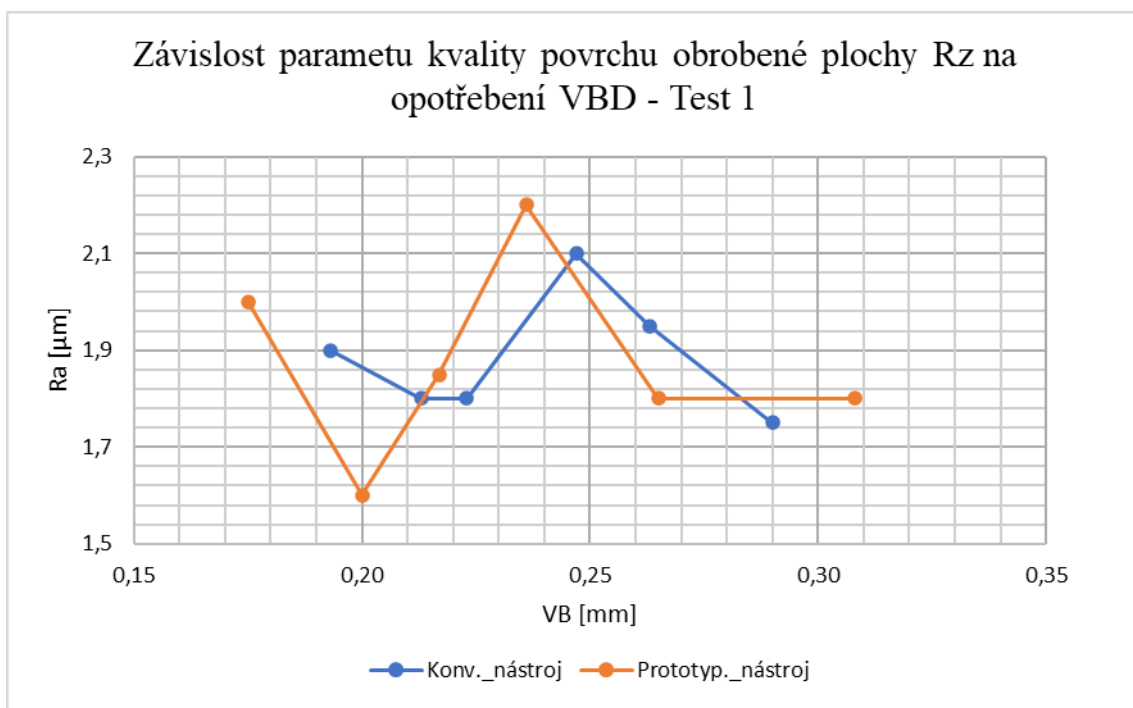
Obr. 5.7: Graf závislost růstu opotřebení hřbetu VBD na způsobu chlazení – Test 1.

Ze získaných závislostí je patrné, že opotřebení na hřbetu by pravděpodobně po 7. přejezdu stále nedosáhlo hodnoty VB_{krit} . Na základě nesplnění podmínky o maximálním počtu přejezdů pro jednotlivé testy, popsané na začátku této podkapitoly, bylo rozhodnuto o ukončení Testu 1 a byl naplánován Test 2 s vyšší hodnotou řezné rychlosti. Důvodem ke změně právě tohoto parametru byl předpoklad, že právě tímto zásahem dojde k výraznějšímu růstu opotřebení hřbetu po jednotlivých přejezdech, tak jak bylo popsáno v podkapitole 5.2.

Závislost parametrů kvality povrchu R_a a R_z na opotřebení hřbetu jsou znázorněny v grafech 5.2 a 5.3.



Obr. 5.8: Graf závislosti parametru kvality povrchu obrobene plochy Ra na opotrebení hřbetu VBD – Test 1.



Obr. 5.9: Graf závislosti parametru kvality povrchu obrobene plochy Rz na opotrebení hřbetu VBD – Test 1.

Hodnoty Ra a Rz se po jednotlivých přejezdech pohybovaly ve standardním rozmezí hodnot předpokládaných pro obrábění daného materiálu použitou strategií, a proto lze prohlásit, že za podmínek testu 1 byl proces obrábění stabilní. Hodnoty Ra se konkrétně pohybovaly v intervalu od 0,3 µm do 0,41 µm a hodnoty Rz od 1,6 µm do 2,2 µm. Ze získaných závislostí dále není patrné, že by hodnota opotrebení hřbetu VB měla výrazný vliv na kvalitu výsledného povrchu.

5.5.2 Test 2

Tento test proběhl na základě výsledků z testu 1, kdy nebylo dosaženo hodnoty VB_{krit} po předem stanoveném počtu přejezdů a ze získaných závislostí nebylo pravděpodobné, že by se trend růstu opotřebení měl s přibývajícím počtem přejezdů výrazněji změnit. Oproti prvnímu testu zde byla zvýšena hodnota řezné rychlosti z $v_c = 75$ m/min na hodnotu $v_c = 100$ m/min. Stejně jako u předchozího testu byla zvolena kritériální hodnota opotřebení hřbetu $VB_{krit} = 0,4$ mm. U každého z nástrojů bylo provedeno 1 opakování pro ověření výsledků z prvního měření. Celkem byly tedy realizovány 2 série přejezdů u konvenčního nástroje a 2 série přejezdů u prototypového nástroje. Konkrétní naměřené hodnoty VB a dopočtené hodnoty t jsou uvedeny v následujících tabulkách 5.8 a 5.9.

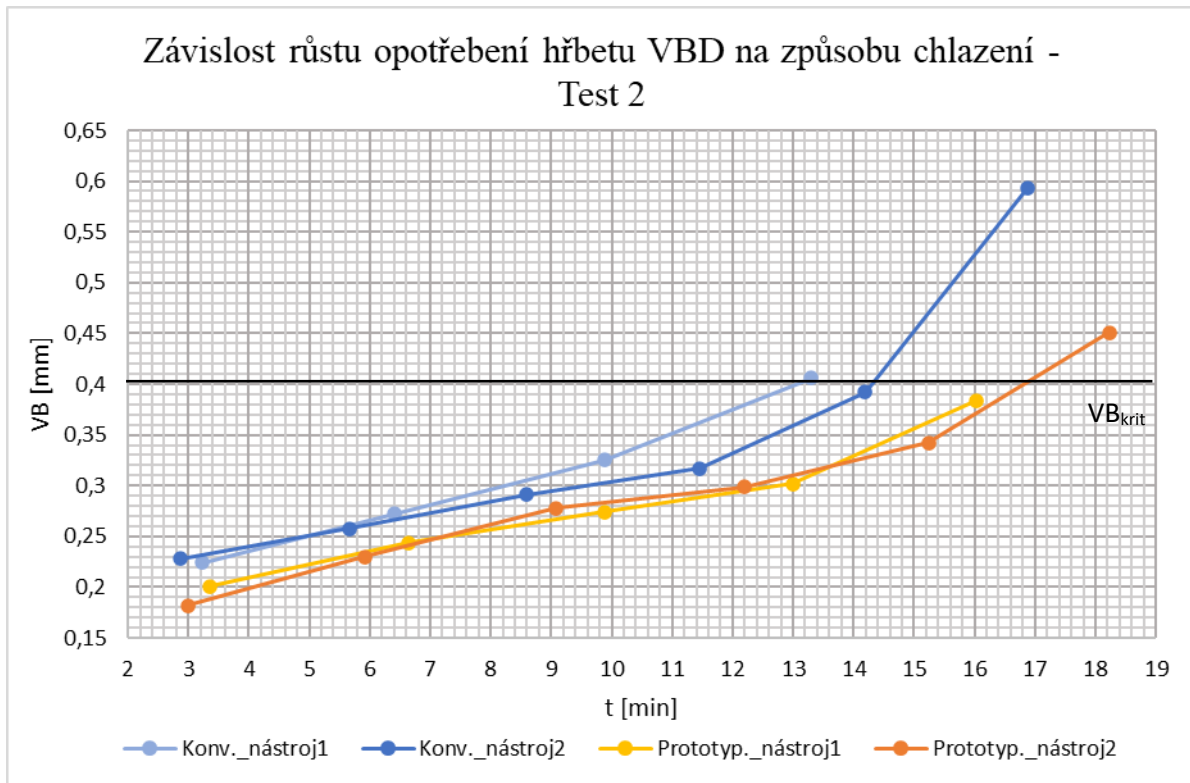
Tab. 5.6: Naměřené a dopočtené hodnoty – Test 2 – konvenční nástroj.

Test 2 – konvenční nástroj				
	opakování č. 1		opakování č. 2	
přejezd	t [min]	VB [mm]	t [min]	VB [mm]
1	3,233	0,224	2,863	0,228
2	6,404	0,272	5,665	0,258
3	9,883	0,325	8,589	0,291
4	13,300	0,406	11,453	0,317
5	-	-	14,192	0,392
6	-	-	16,871	0,593

Tab. 5.7: Naměřené a dopočtené hodnoty – Test 2 – prototypový nástroj.

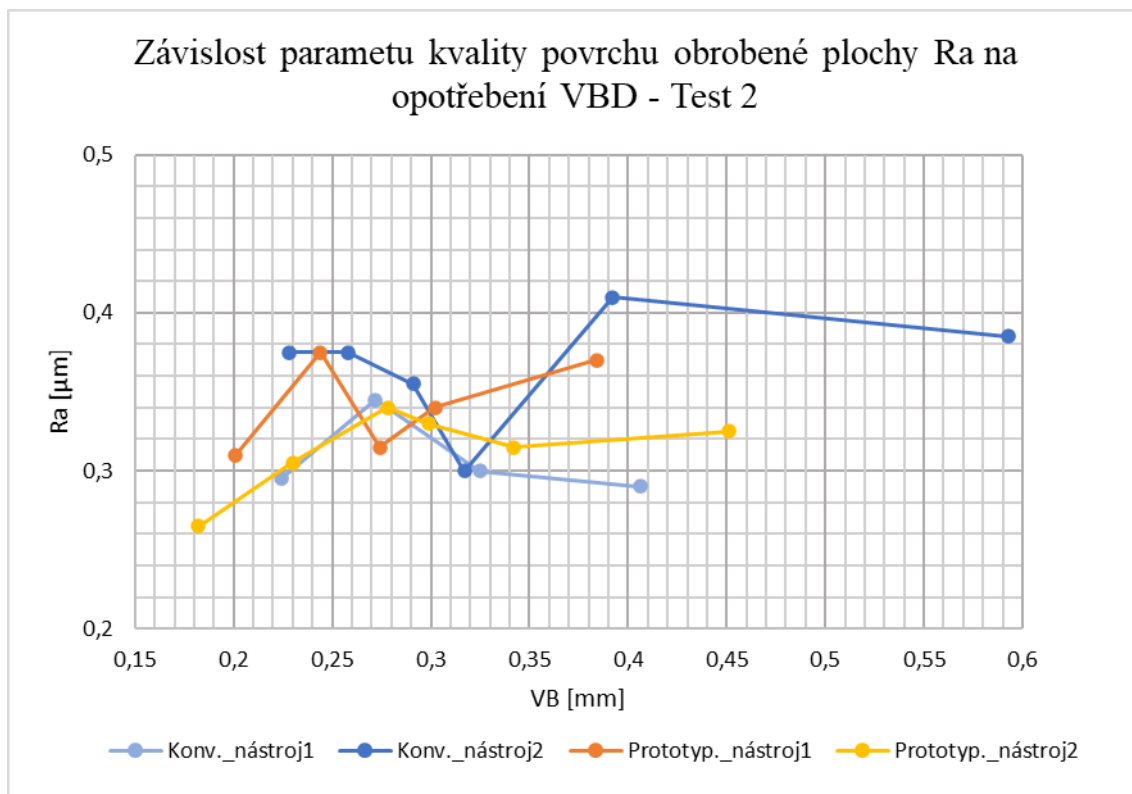
Test 2 – prototypový nástroj				
	opakování č. 1		opakování č. 2	
přejezd	t [min]	VB [mm]	t [min]	VB [mm]
1	3,356	0,201	2,986	0,182
2	6,650	0,244	5,911	0,230
3	9,883	0,274	9,082	0,278
4	12,992	0,302	12,192	0,299
5	16,040	0,384	15,239	0,342
6	-	-	18,226	0,451

Tyto hodnoty byly zaneseny do grafu 5.4. Z grafu je patrné, že při těchto řezných podmínkách dosahuje prototypový nástroj větší životnosti.

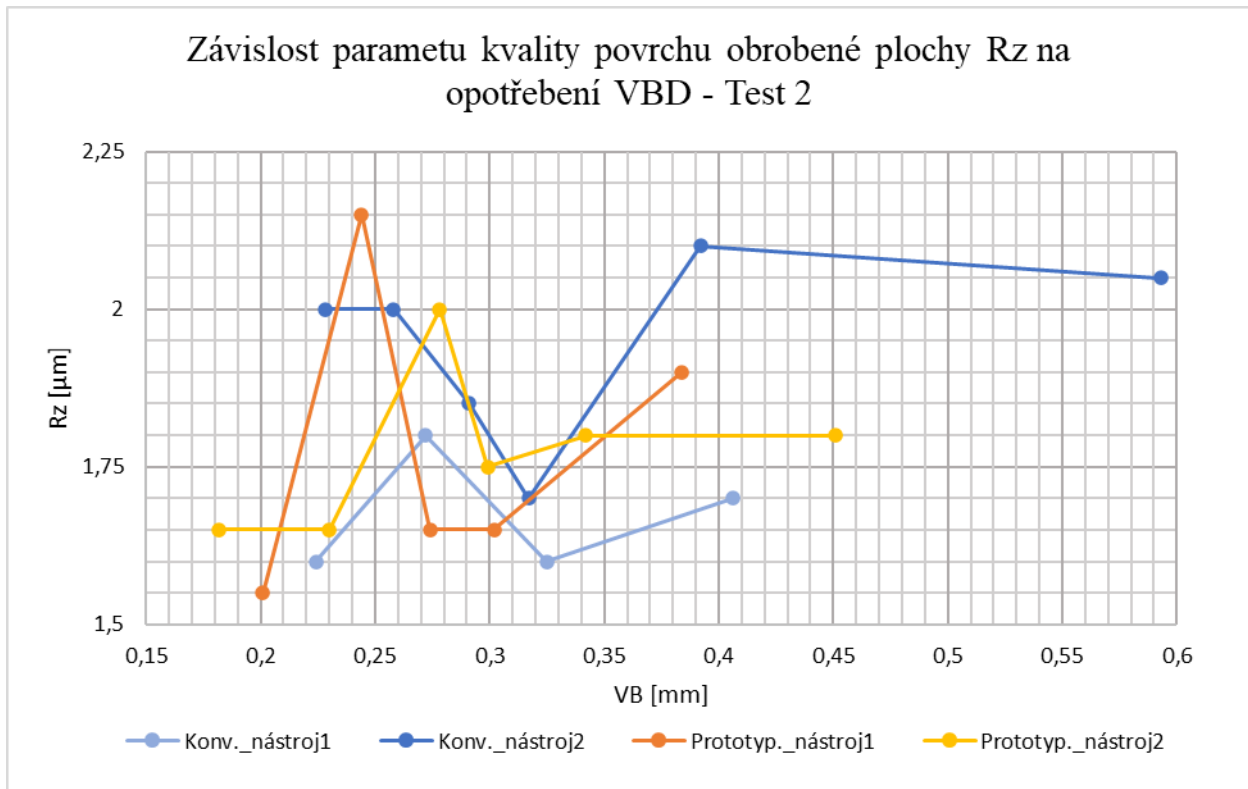


Obr. 5.10: Graf závislosti růstu opotřebení hřbetu VBD na způsobu chlazení – Test 2.

Také v tomto testu byly měřeny parametry R_a a R_z a jejich hodnoty jsou uvedeny v následujících grafech 5.5 a 5.6.



Obr. 5.11: Graf závislosti parametru kvality povrchu obrobene plochy R_a na opotřebení hřbetu VBD – Test 2.



Obr. 5.12: Graf závislosti parametru kvality povrchu obrobené plochy Rz na opotřebení hřbetu VBD – Test 2.

Stejně jako u předchozího testu můžeme na základě naměřených hodnot prohlásit, že za podmínek testu 2 byl proces obrábění stabilní a ze získaných závislostí nevyplývá fakt, že velikost opotřebení hřbetu VB má výrazný vliv na výslednou kvalitu obrobeného povrchu. Hodnoty Ra se v tomto testu pohybovaly v intervalu hodnot od 0,265 µm do 0,41 µm a Rz od 1,55 µm do 2,15 µm. Kompletní technické zhodnocení testovaných variant je zpracováno v následující kapitole.

6 Technické hodnocení navržených variant

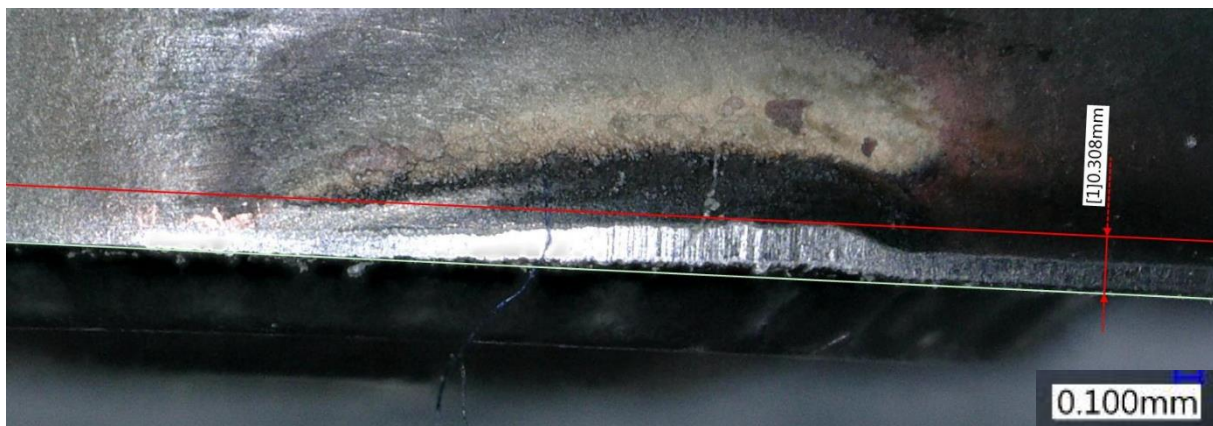
Prototypový nástroj vyrobený za účelem vylepšení systému chlazení dosáhl oproti původnímu nástroji během testu 2 vyšší životnosti. Důvody zvýšení životnosti prototypového nástroje jsou uvedeny dále v této kapitole, kde jsou provedeny analýzy získaných dat z jednotlivých experimentů, na základě kterých jsou vypracovány hodnocení jednotlivých variant.

6.1 Chování nástrojů během experimentu

Pro tuto práci byly realizovány celkem 2 testy, které se lišily v nastavení rezných podmínek, respektive v nastavení rezné rychlosti. Jak se předpokládalo, chování jednotlivých nástrojů se s navýšením rezné rychlosti také změnilo.

6.1.1 Test 1

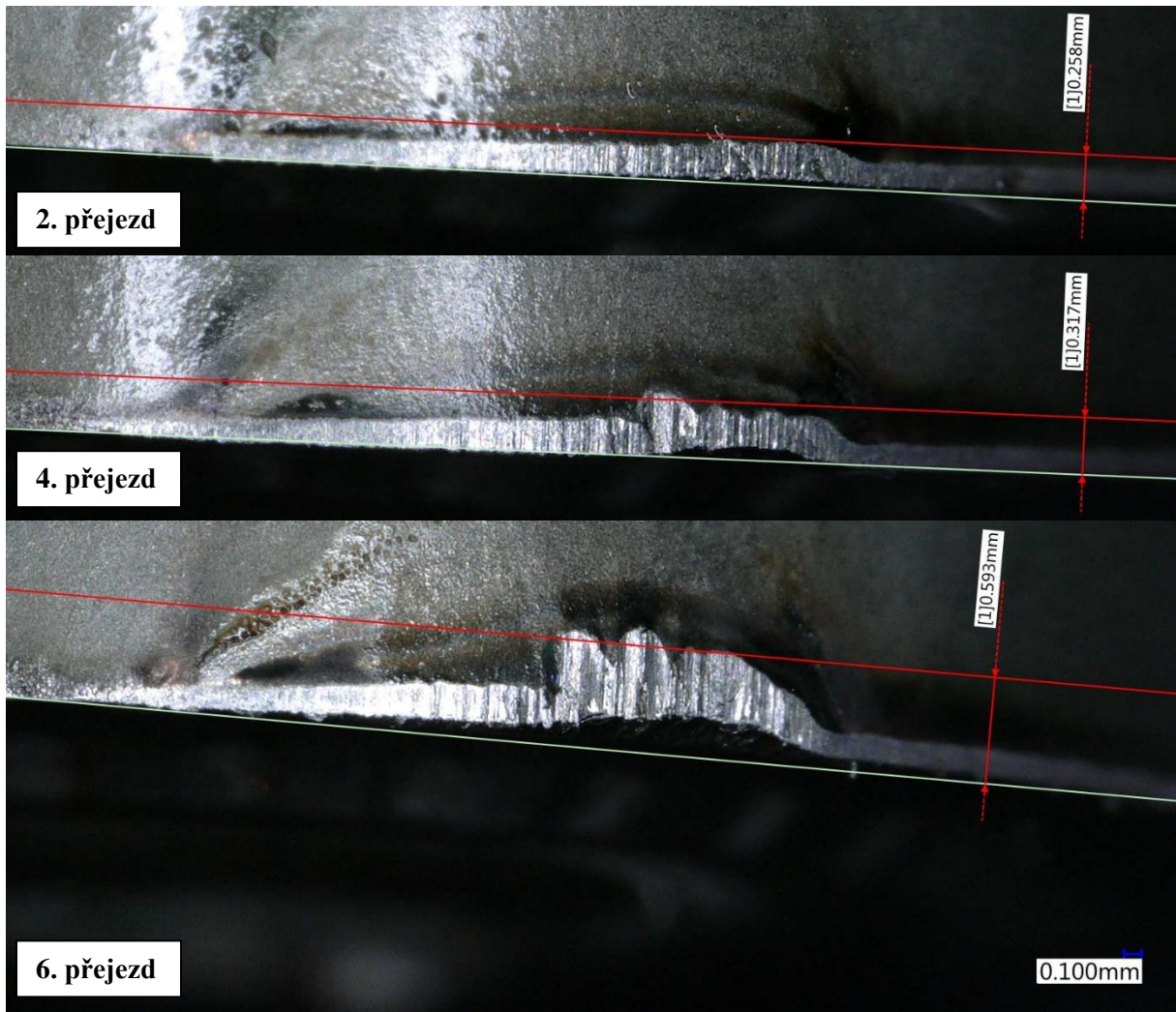
Oba testované nástroje prokazovaly během tohoto testu rovnoměrný pozvolný růst opotřebení hřbetu břitové destičky. Tento pozvolný růst byl zdůvodněn nevhodně zvolenou reznou rychlostí, kdy při hodnotě $v_c = 75$ m/min a hodnotě hloubky řezu $a_p = 1$ mm, nebylo během procesu řezání generováno tak velké množství tepla, aby opotřebení na hřbetu rostlo strměji. Jak je vidět z obrázků 6.1, ani po 6. přejezdu není dosaženo hodnoty $VB_{krit} = 0,4$ mm. Objevuje se zde však už náznak začínajícího opotřebení ve formě vrubu, které je pro obrábění materiálů z této skupiny obrobitelnosti typické.



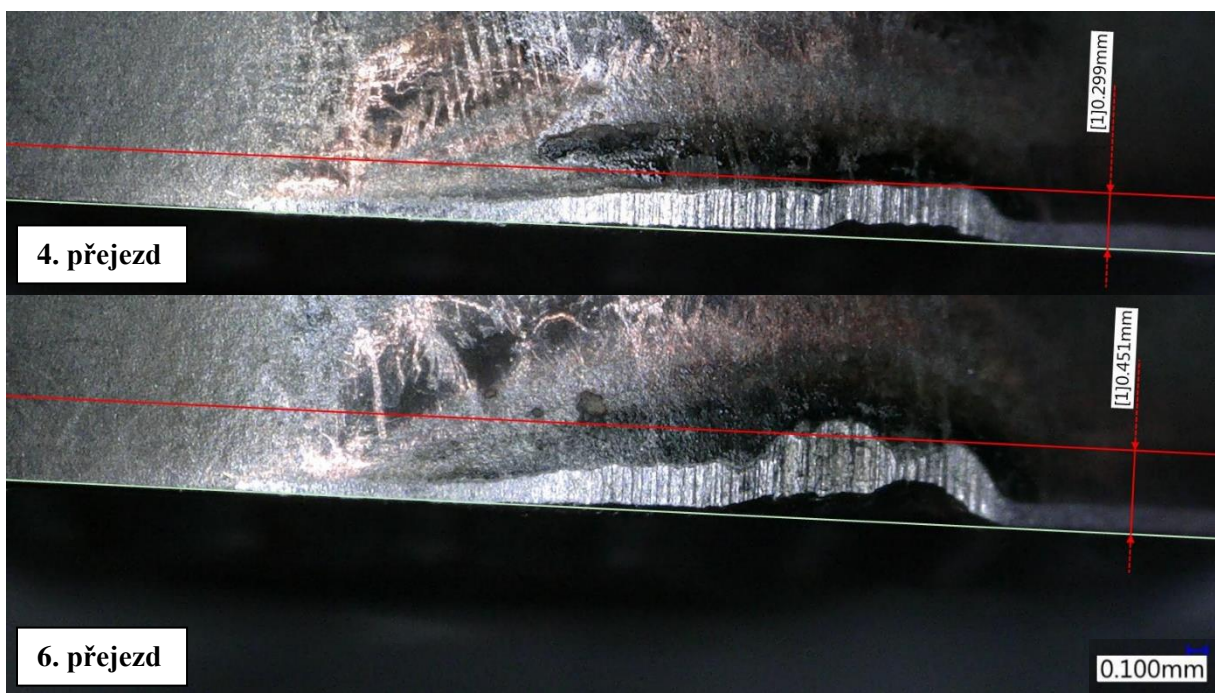
Obr. 6.1: Opotřebení hřbetu VBD u prototypového nástroje po 6. přejezdu.

6.1.2 Test 2

Se zvýšenou reznou rychlostí se dle předpokladu zvýšila také dynamika růstu opotřebení na hřbetu VBD u obou nástrojů. V důsledku chlazení hřbetu u prototypového nástroje byl však růst opotřebení pozvolnější, než tomu bylo u nástroje konvenčního. U obou nástrojů se po určitém času stráveném v řezu objevilo opotřebení ve formě vrubu. Vznik a růst vrubu bylo zajímavé sledovat, avšak pro účely našeho experimentu nebyla jeho velikost podstatná. Stejně tak jako bylo dosaženo hodnoty VB_{krit} dříve u konvenčního nástroje, také vrub se zde objevil dříve. U konvenčního nástroje se vrub objevil kolem 9. minuty, oproti 11. minutě u nástroje prototypového. Ukázky celkového opotřebení hřbetu po vybraných přejezdech konvenčního nástroje během testu 2 jsou uvedeny na obrázku 6.2 a u prototypového nástroje na obrázku 6.3.



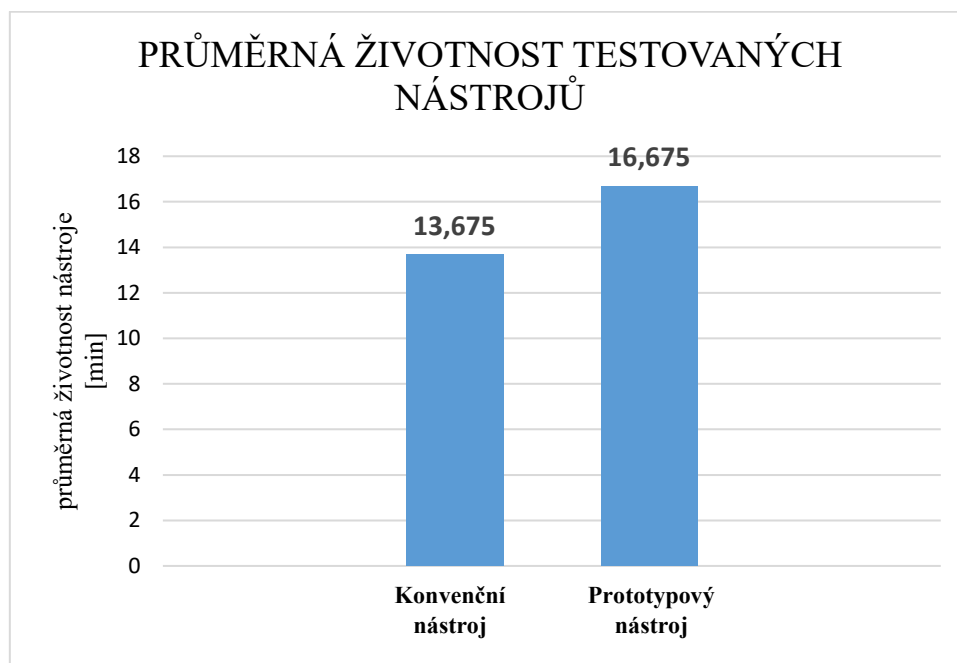
Obr. 6.2: Růst opotřebení na hřbetu VBD u konvenčního nástroje – test 2, 2. opakování.



Obr. 6.3: Růst opotřebení na hřbetu VBD u prototypového nástroje – test 2, 2. opakování.

6.1.3 Vyhodnocení životnosti

Z grafu závislosti růstu opotřebení hřbetu VBD v čase na způsobu chlazení byly odečteny hodnoty časů, ve kterých bylo dosaženo předem zvolené hodnoty $VB_{krit} = 0,4$ mm. Takto zjištěné časy byly během jednotlivých opakování pro každý z nástrojů zprůměrovány, čímž byly stanoveny průměrné hodnoty životnosti každého z nástrojů. Průměrné hodnoty životností nástrojů jsou uvedeny v grafu 6.1.



Obr. 6.4: Graf průměrné životnosti testovaných nástrojů.

Průměrná životnost prototypového nástroje dosáhla hodnoty 16,675 minut, což představuje rozdíl 3 minuty oproti průměrné životnosti nástroje konvenčního. V procentuální reprezentaci to znamená, že za podmínek testu 2 prototypový nástroj vydržel v řezu průměrně o 22% déle než nástroj konvenční.

6.2 Závěrečné zhodnocení

Výsledkem provedeného experimentu je potvrzení předpokladu, že kombinovaným chlazením čela společně se hřbetem VBD lze při soustružení titanové slitiny Ti-6Al-4V, za určitých podmínek prodloužit její životnost, které dosahuje při chlazení samotného čela. Dalším příznivým zjištěním je fakt, že z naměřených závislostí růstu opotřebení na čase stráveném v řezu je vidět, že křivky závislosti u prototypového nástroje jsou si daleko více podobné, což znamená, že v grafu jsou umístěny těsně u sebe. Důvodem může být, že vlivem intenzivnějšího chlazení roste opotřebení u prototypového nástroje s menší mírou náhodnosti než u nástroje konvenčního. V důsledku toho je možné přesněji odhadovat chování nástroje při dalším použití.

Z důvodu poruchy vřetena stroje, na kterém měl být experiment proveden, byla ve výsledku vyrobena jen jedna varianta prototypového nástroje. Pro účely této práce byla tato varianta postačující, protože další navržené varianty nástrojů mají stejné konstrukční myšlenky, jako je nasměrování vývodových kanálků na hřbet VBD nebo vzdálenost těchto kanálků od samotného hřbetu VBD, a tím pádem se nepředpokládá, že výsledky by se výrazně lišily.

I přes pozitivní výsledky je nutné si shrnout skutečnosti, které bezesporu mají vliv na zjištěné výsledky. Takovými skutečnostmi jsou:

- Během jednotlivých opakování se s přibývajícím počtem přejezdů zmenšoval obráběný průměr, a tím pádem se také zkracovala délka kontaktu hřbetu nástroje s obrobkem. Vedle toho se také zvětšoval celkový prostor mezi hřbetem nástroje a obrobkem, což ve výsledku znamená intenzivnější chlazení hřbetu nástroje vlivem většího objemu řezné kapaliny dopadajícího do tohoto prostoru. To znamená, že mezi jednotlivými přejezdy nepanovaly totožné podmínky a růst opotřebení tedy nemusel probíhat stejně. Tento problém by šlo vyřešit sjednocením podmínek, kdy by pro každou sérii přejezdů byl použit nový polotovar o stejných rozměrech. To však v tomto případě nebylo možné z ekonomických důvodů. Neznačí to však, že se s tímto problémem při plánování experimentu nepočítalo. S ohledem na tuto problematiku bylo rozhodnuto o snížení hloubky řezu a rozdělení přejezdové vzdálenosti na 2 poloviny, aby se obráběný průměr zmenšoval co nejpomaleji, a tím pádem rozdíl mezi prvním a posledním obráběným průměrem celého experimentu byl co nejmenší.
- Přívod řezné kapaliny není na použitém stroji konstruován pro takové hodnoty tlaků, které byly pro navržené řešení zamýšleny použít. Na základě zkušeností z jiných výzkumů a zkušeností lze předpokládat, že při vyšších hodnotách tlaku řezné kapaliny, by došlo ještě k většímu výslednému prodloužení životnosti řešeného nástroje.

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout a realizovat kombinovaný systém chlazení čela a hřbetu VBD pro vnitřní zapichovací nůž SL70-SRDCR-50-12HP, který se ve firmě PCC používá pro hrubování vnitřní kapsy dílu z titanové slitiny Ti-6Al-4V. Toto řešení vzniklo za účelem prodloužení životnosti tohoto nástroje. Bylo předpokládáno, že cíle práce budou naplněny, protože existuje celá řada experimentů, které se touto problematikou již zabývaly.

Za účelem dosažení předem stanovených cílů byly navrženy celkem 3 konstrukční provedení nástrojů. Z důvodu poruchy vřetene na stroji, na který byl experiment naplánován a následnému časovému zdržení zaviněnému hledáním náhradního řešení, byl pro účely práce vyroben jen jeden prototypový nástroj. Následně byl navržen experiment pro porovnání životností prototypového nástroje s nástrojem původním. Vyhodnocením tohoto experimentu bylo prokázáno prodloužení životnosti prototypového nástroje. Výsledné prodloužení životnosti dosáhlo hodnoty 22%, což představuje velice dobrý výsledek.

Hlavním výstupem této práce tedy je potvrzení předpokladů o pozitivním vlivu kombinovaného chlazení hřbetu s čelem nástroje na jeho životnost při obrábění těžkoobrobitelných materiálů, jako je například použitá titanová slitina Ti-6Al-4V. Je také možné konstatovat, že cíle práce byly splněny a jejich výsledky jsou využitelné pro další výzkum v této oblasti. Dalšími kroky ve vývoji by mohlo být potvrzení dosažených výsledků s větším počtem opakování, s vyšším tlakem rezné kapaliny a se stejnými podmínkami jednotlivých přejezdů, zejména za účelem minimalizovat vliv zmenšujícího se průměru obrobku na průběh opotřebení.

Seznam použitých zdrojů

- [1] MOZAMMEL, M., DHAR, N. R., MD AWAL, K. High-pressure coolant on flank and rake surfaces of tool in turning of Ti-6Al-4V: investigations on forces, temperature, and chips. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2017, 90:1977–1991 [cit. 2021-01-25]. DOI: 10.1007/s00170-016-9511-6. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00170-016-9511-6.pdf>
- [2] MOZAMMEL, M., DHAR, N. R., MD AWAL, K. High-pressure coolant on flank and rake surfaces of tool in turning of Ti-6Al-4V: investigations on surface roughness and tool wear. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2017, 90:1825–1834 [cit. 2021-01-25]. DOI: 10.1007/s00170-016-9512-5. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00170-016-9512-5.pdf>
- [3] MARŠÁLEK, Ondřej. *Vliv tlaku chladicí kapaliny na životnost nástroje při soustružení slitin titanu*. Plzeň, 2020. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Luboš Kroft, PhD.
- [4] *Nikl a jeho slitiny, Titan a jeho slitiny* [online] Katedry materiálů a strojírenské metalurgie - Západočeské univerzity v Plzni [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/Nikl_titan.pdf
- [5] *Obráběné materiály* [online]. Sandvik Coromant [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>
- [6] ŽÁK, J., SAMEK, R., BUMBÁLEK, B. *Speciální letecké technologie I*. 1. vyd. 1990, 219 s. ISBN 80-214-0128-1.
- [7] NESLUŠAN, M., CZÁN, A. *Obrábání titánových a niklových zliatin*. 1. vyd. Žilina: EDIS, 2001, 195 s. ISBN 80-7100-933-4.
- [8] KOČMAN, K., PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
- [9] *Řešení pro průmyslová odvětví – Letecký průmysl – Titanium* [online]. Sandvik Coromant [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/industrysolutions/aerospace/titanium/pages/fan-casing.aspx>
- [10] AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění – kniha pro praktiky*. (Přel. z: *Modern Metal Cutting – A Practical Handbook*. Překlad M. Kundera.), 1. vyd. Praha, Scientia, s.r.o., 1997, 857 s. ISBN 91-97 22 99-4-6.
- [11] STEPHENSON David A., AGAPIOU John S., *Metal Cutting Theory and Practice*. Third edition. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2016. ISBN 1466587539.
- [12] VEIGA C., DAVIM J. P., LOUREIRO A. J. R. Properties and Applications of Titanium Alloys: A Brief Review. *E-journal Reviews on Advanced Materials Science* [online]. 2012, 32 (2012) 133-148 [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: http://phys.ipme.nw.ru/e-journals/RAMS/no_23212/05_23212_veiga.pdf

- [13] BUSCH, K., HOCHMUTH, C., PAUSE, B., STOLL A., WERTHEIN R. Investigation of cooling and lubrication strategies for machining high-temperature alloys. *Procedia CMS 2015* [online]. 2016, 41: 835 – 840 [cit. 2021-03-05]. DOI: 10.1016/j.procir.2015.10.005. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827115010574>
- [14] PAWAR, P., PATIL, S., KEKADE, S., PAWAR S., SINGH R. Effect of high pressure coolant on tool wear phenomenon during machining of titanium alloy Ti6Al4V. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2016, ISSN: 1662-7482, Vol. 826, pp. 93-98 [cit. 2021-03-05]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.826.93. Dostupné z: <https://www.scientific.net/AMM.826.93>
- [15] ENAW-*AlCu4MgSi(A)* (ENAW-2017A) Aluminium – 2000 series. [online]. European Steel and Alloy Grades/Numbers [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_alloy_composition_eu.php?name_id=1035
- [16] SHIH-HSIEN Ch. Effects of γ' Precipitation on the Structure and Properties of 713LC Superalloy via HIP Treatment. *The Japan Institute of Metals - Materilas Transactions* [online]. 2012, Vol. 53, No. 2, pp. 446 to 452 [cit. 2021-04-15]. DOI: 10.2320/matertrans.M2011287. Dostupné z: <https://www.jim.or.jp/journal/e/pdf3/53/02/446.pdf>
- [17] UNS R30075 (ASTM F75, ISO 5832-4) Co-Cr-Mo Alloy [online]. [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/UNS-R30075-ASTM-F75-ISO-5832-4-Co-Cr-Mo-Alloy>
- [18] VEČEŘA, Jiří. *Materiály používané v leteckém průmyslu*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Simona Pospíšilová, PhD.
- [19] PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu II*. Brno: Nakladatelství Cern, 1999. 350s. ISBN 80-7204-248-3.
- [20] *Technická příručka - Upichování a zapichování* [online]. SANDVICK Coromant [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/downloads/pages/default.aspx>
- [21] *Trochoidní soustružení se systémem CAM pro obrábění obtížně obrobitelných kovů a houževnatých materiálů* [online]. CERATIZIT [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: https://cuttingtools.ceratizit.com/cz/cs/nastroje/soustru_eni/p_iru_ka/trochoidni-soustrueni.html
- [22] URBKAIN, G., LÓPEZ DE LACALLE, L. N., CAMPA, F. J., FERNÁNDEZ, A., ELÍAS, A. Stability prediction in straight turning of a flexible workpiece by collocation method. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2012, Vol. 54-55, pp. 73-81 [cit. 2015-04-15]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2011.11.008. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0890695511002215?casa_token=v16TNKmd_iAAAAAA:tHyCTP_I2O2pn7j1GWMZ6L5YagLmPI84I7svtfLHsQGlr8AmgXRTF7fyKKcL1bkUuUpJok1v_Lc#s0020
- [23] *SL70-SRD CR-50-12HP* [online]. SANDVICK Coromant [cit. 2021-01-25]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/productdetails.aspx?c=SL70-SRD CR-50-12HP>
- [24] MIKOVEC, M. a kolektiv: *Obrábění těžkoobrobitelných materiálů*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury SNTL, 1963, 316 s. ISBN: 04-220-63.

Seznam příloh

Příloha č. 1 – Materiálový list TITAN Grade 5 (6Al-4V)

Příloha č. 2 – Specifikace stroje MAZAK QUICK TURN NEXUS 250-II MY

Příloha č. 3 – Specifikace optického mikroskopu Keyence VHX-6000

Příloha č. 4 – Specifikace drsnoměru SURTRONIC DUO

PŘÍLOHY DIPLOMOVÉ PRÁCE

PŘÍLOHA č. 1

Materiálový list TITAN Grade 5 (6Al-4V)

Die Legierung Ti-6Al-4V ist die am meisten verwendete der Alpha-Beta Gruppe und ist die bekannteste aller Titanlegierungen. Bearbeitetes Material wird in der Luftfahrtindustrie, Medizin und anderen Anwendungen eingesetzt, bei denen eine gute Festigkeit im Verhältnis zum Gewicht, sowie gute korrosionsbeständige Eigenschaften gefordert werden. Weiter ist sie giesbar und findet vermehrt Anwendungen auch bei Sportgeräten.

Ti-6Al-4V alloy is the most widely used titanium alloy of the alpha-plus-beta class, and is also the most common of all titanium alloys. The alloy is castable and is utilized "as cast" in sporting goods. The wrought material is used in aerospace, medical, and other applications where moderate strength, good strength to weight, and favorable corrosion properties are required.

Produktformen Product Forms	Blech, Band, Stab, Draht, Gussteile, Schmiedestücke, Ringe und Knüppel	Sheet, Plate, Strip, Bar, Rod, Wire, Castings, Forgings, Rings and Billet
Normen und Bezeichnungen Major Specifications	UNS R56400 W-Nr.: 3.7165 ASTM B 265 / AMS 4911 (Blech, Band), ASTM B 348 / AMS 4928 (Stab) MIL-T-9046	UNS R56400 W-Nr.: 3.7165 ASTM B 265 / AMS 4911 (plate, sheet, strip), ASTM B 348 / AMS 4928 (bar) MIL-T-9046
Chem. Zusammensetzung Chemical Composition, %	Grenzwerte Ti Rest O 0.20 V 3.5 - 4.5 Fe 0.40 AL .. 5.50 - 6.75 H..... max. 0.015 N 0.05 C 0.08	Limiting Ti Balance O 0.20 V 3.5 - 4.5 Fe 0.40 AL .. 5.50 - 6.75 H..... max. 0.015 N 0.05 C 0.08
Physikalische und thermische Eigenschaften Physical Constants and Thermal Properties	Dichte, lb/in ³ 0.160 g/cm ³ 4.43 Schmelzbereich, etwa. °F 3000 °C 1648 Beta Transus °F +/- 25 1784 °C +/- 4 980 Ausdehnungsbeiwert, 10 ⁻⁶ in/in • F 32 - 212°F 5.0 32 - 1200°F 5.9 32 - 600°F 5.3 32 - 1500°F 6.1 32 - 1000°F 5.6 um/m • °C 0 - 100°C 9.1 0 - 649°C 10.7 0 - 316°C 9.6 0 - 816°C 11.0 0 - 538°C 10.1 Elastizitätsmodul, 10 ⁶ psi 16.5 Torsionsmodul, 10 ⁶ psi 6.1 Spezifische Wärme, Btu/lb•°F 0.135 J/kg•°C 565.2 Glühtemperatur ganz °F ... 1300-1525°/15 min., -2 Std., AC °C 704-838°/15 min., -2 Std., AC spannungsarm °F 900-1200°/1-4 Std., AC °C 495-659°/1-4 Std., AC Schmiedetemperatur Vorschmieden °F 1750 - 1800° °C 962 - 989° Fertigschmieden °F 1650 - 1750° °C 812 - 962°	Density, lb/in ³ 0.160 g/cm ³ 4.43 Melting Range, approx. °F 3000 °C 1648 Beta Transus °F +/- 25 1784 °C +/- 4 980 Coefficient of Expansion 10 ⁻⁶ in/in • F 32 - 212°F 5.0 32 - 1200°F 5.9 32 - 600°F 5.3 32 - 1500°F 6.1 32 - 1000°F 5.6 um/m • °C 0 - 100°C 9.1 0 - 649°C 10.7 0 - 316°C 9.6 0 - 816°C 11.0 0 - 538°C 10.1 Elasticity-Tension Modulus, 10 ⁶ psi 16.5 Elasticity-Torsion Modulus, 10 ⁶ psi 6.1 Specific Heat, Btu/lb•°F 0.135 J/kg•°C (565.2) Annealing Temp full °F 1300-1525°/15 min., -2 hrs, AC °C 704-838°/15 min., -2 hrs, AC stress relief °F 900-1200°/1-4 hrs, AC °C 495-659°/1-4 hrs, AC Forging Temp Blocking °F 1750 - 1800° °C 962 - 989° Finishing °F 1650 - 1750° °C 812 - 962°
Typische mechanische Eigenschaften Typical Mechanical Properties	(Geglüht) Zugfestigkeit, RT min. ksi MPA Streckgrenze, RT min. 120 828 Dehnung, min. 10 % Brucheinschnürung, min. 25 %	(Annealed) Tensile Strength, RT min. 130 895 Yield Strength, RT min. 120 828 Elongation, min. 10 % Reduction of Area, min. 25 %

Alle Angaben ohne Gewähr / All information are supplied without liability

PŘÍLOHA č. 2

Specifikace stroje MAZAK QUICK TURN NEXUS 250-II MY



1500 mm Bed (Universal)		Hodnoty
CAPACITY	Chuck size main spindle	10 ″
	Maximum swing	675 mm
	Maximum machining diameter	380 mm
	Bar work capacity main spindle (dependant on chuck system)	80 mm
MAIN SPINDEL	Rotating speed maximum	4,000 min ⁻¹
	Motor output (30 minute rating)	26.0 kW
TURRET	Nuber of tools	12
	Mill spindle motor output (10 min rating)	5.5 kW
FEED AXES	Travel (X axis)	230 mm
	Travel (Y axis)	100 mm
	Travel (Z axis)	1,595 mm
MACHINE DIMENSIONS	Lenght	4,382 mm
	Widht	2,095 mm

PŘÍLOHA č. 3

Specifikace optického mikroskopu Keyence VHX-6000



Product Detail

Item	VHX-6000 Digital Microscope
Company	KEYENCE Corporation
Price	Inquire
Catalog Number	VHX-6000
Quantity	EA
Type	Digital
Resolution	1600 x 1200, 3200 x 2400, 4800 x 3600
Light Source	High brightness LED
Dimensions	(WxDxH) 550 x 200 x 470 cm
Frame Rate	Up to 50 frames/sec.
Application	Stereoscopic, Measurement and Metallurgical microscopy, 3D imaging
Features	Camera: 18 Megapixel, 1/1.8-inch, CMOS image sensor

PŘÍLOHA č. 4

Specifikace drsnoměru SURTRONIC DUO



Drsnoměr SURTRONIC DUO

Mobilní drsnoměr s interní posuvnou jednotkou

- Model: SURTRONIC DUO
- Systém sondy: Systém běžící sondy
- Rozsah měření drsnosti povrchu: 199 μm , 40 μm
- Dráha skenování: 5 mm
- Rozlišení drsnosti povrchu: 0,01 μm
- Prahová vlnová délka: 0,8 mm
- Typ přenosu dat: USB
- Hmotnost brutto: 1149 g