

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Suché obrábění titanových slitin

Dry machining of titanium alloys

AUTOR:

Zdeněk Tobiáš

STUDIJNÍ PROGRAM:

B VES TMES 2016

VEDOUCÍ PRÁCE:

Ing. Petr Mikeš, Ph.D.

PRAHA 2019



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Tobiáš** Jméno: **Zdeněk** Osobní číslo: **466479**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Suché obrábění titanových slitin

Název bakalářské práce anglicky:

Dry machining of titanium alloys

Pokyny pro vypracování:

Obrábění titanových slitin - rešerše
Návrh a realizace experimentu suchého obrábění titanové slitiny
Hodnocení kvality obrobené plochy

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Petr Mikeš, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **03.04.2019** Termín odevzdání bakalářské práce: **19.07.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Petr Mikeš, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

12.04.2019
Datum převzetí zadání

Mobil
Podpis studenta

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto Bakalářskou práci na téma Suché obrábění titanu vypracoval samostatně a všechny informace a podklady použité v této práci jsou řádně odkázány v seznamu literatury.

V Praze dne 27.7.2018

.....

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu své bakalářské práce, panu Ing. Petru Mikešovi, Ph.D. za čas, cenné rady a připomínky při vypracování bakalářské práce.

Anotace:

Tato bakalářská práce pojednává o slitinách titanu, břitových destičkách užitých pro rovinné frézování a v celkovém pojetí suché obrábění titanu (bez použití strojního chlazení). V „rešerši“ jsou uvedené některé vyměnitelné břitové destičky pro frézování s doporučenými řeznými podmínkami od výrobců, které budou mít pouze informativní hodnotu kvůli zvolené strategii obrábění.

Klíčová slova

Titan, Slitina titanu, Obrábění, Frézování, obráběcí nástroje, Výroba titanu, TiAl6V4, Vyměnitelné břitové destičky.

Anotation

This bachelor thesis deals with titanium alloys, cutting inserts used for milling and the overall concept of dry titanium machining (without the use of machine cooling). The "search" lists some interchangeable inserts for milling with limited cutting conditions from manufacturers, which will only be of value for the selected machining strategies.

Keywords

Titanium, Titanium Alloy, Machining, Milling, Machine Tools, Titanium Production, TiAl6V4, Indexable inserts.

Obsah

Prohlášení:	3
Poděkování.....	4
Anotace:.....	5
Klíčová slova.....	5
Anotation	6
Keywords	6
Seznam použitých symbolů a zkratk	9
1 Úvod:	10
2 Titan	11
2.1 Historie	11
2.2 Výroba titanu	12
2.2.1 Krollův proces:	12
2.2.2 Příprava materiálu pro chloridaci	13
2.2.3 Redukce titanové houby	13
2.2.4 Přetavení titanové houby na kujný materiál	13
2.3 Technicky čistý titan	15
2.4 Titanové slitiny	16
2.4.1 Slitiny α	17
2.4.2 Slitiny pseudo α ($p\alpha$)	17
2.4.3 Slitiny $\alpha + \beta$	17
2.4.4 Slitiny pseudo β ($p\beta$)	17
2.4.5 Slitiny β	18
2.5 Slitina TiAl6V4.....	18
2.5.1 Využití této slitiny	19
3 Obrábění	20
3.1 Technologické vlastnosti titanu	20
3.1.1 Třecí vlastnosti.....	21
3.1.2 Svařitelnost.....	22
3.1.3 Tvářitelnost.....	22
3.1.4 Obecné Zásady při obrábění.....	23

4	Frézování	24
5	Obrábění těžkoobrobitelných materiálů	26
5.1	Mazání	26
5.2	Vysokorychlostní obrábění	27
5.2.1	Trochoidní frézování	28
5.2.2	Truemill	29
6	Suché obrábění	30
6.1.1	Výhody:	30
6.1.2	Nevýhody:	30
6.2	Nástroje pro frézování	31
6.3	Nejčastější povlaky při frézování titanu	33
7	Experiment	34
7.1	Postup při experimentu	34
7.2	Stroj	35
7.3	Výběr VBD pro provedení daného experimentu	36
7.4	Nástroj	38
7.5	Polotovar	39
7.6	Instalace dynamometru do stroje	40
7.7	Vytvoření G-M kódu	41
7.8	Obrobení tvaru pro měření	43
7.9	Měření sil	44
7.10	Měření drsnosti	46
7.11	Vyhodnocení	48
7.12	Porovnání sil	53
7.13	Opotřebení	56
8	Závěr	61
	Seznam obrázků	63
	Seznam grafů	65
	Seznam tabulek	66
	Seznam literatury:	67

Seznam použitých symbolů a zkratk

Označení	Legenda	Jednotka
BCC	Kubická prostorově středěná mřížka	[-]
HCP	Hexagonální mřížka	[-]
ρ	Hustota	[kg.m-3]
D	Průměr nástroje	[mm]
E	Modul pružnosti v tahu	[GPa]
$F_x = F_C$	Řezná síla	[N]
$F_y = F_{CN}$	Normálová síla	[N]
$F_z = F_P$	Pasivní síla	[N]
f_z	Posuv na zub	[mm]
f_{min}	Minutový posuv	[mm/min]
vc	řezná rychlost	[m/min]
a_e	hloubka řezu radiální	[mm]
a_p	hloubka řezu axiální	[mm]
z	počet zubů	[zub]
MQL	minimální množství maziva	[-]
HSC	Vysokorychlostní obrábění	[mm]
HSM	Vysokorychlostní posuv	[-]
VBD	Vyměnitelná břitová destička	[-]
CVD	chemická depozice z plynné fáze	[-]
PVD	Fyzická depozice z plynné fáze	[-]
λ	Tepelná vodivost	[W. m ⁻¹ . K ⁻¹]
c	Měrná tepelná kapacita	[J. kg ⁻¹ . K ⁻¹]
t	Teplota tavení	[°C]
σ	Modul pružnosti	[GPa]
VB	Velikost opotřebení břitu	[mm]
γ_o	Úhel čela nástroje	[°]
μ	Koeficient tření	[mm]
R_a	střední aritmetická hodnota drsnosti	[μm]
R_z	maximální výška profilu	[μm]
R_{max}	Maximální hloubka drsnosti	[μm]
R_{Sm}	střední vzdálenost rýh	[μm]
n	Otáčky nástroje	[min-1]
b _d	Šířka drážky	[mm]
h _d	Hloubka drážky	[mm]
L _u	Délka úseku	[mm]
L _n	Délka nájezdu	[mm]
L	Délka polotovaru	[mm]

1 Úvod:

Bakalářské práce je orientovaná na problematiku suchého obrábění slitin titanu, které jsou využívány ve všech možných odvětvích jako medicínský, automobilový, letecký, kosmický či chemický průmysl. Cílem této práce je vyhodnotit, jak se chová destička s různým úhlem čela při nastavení odlišných řezných podmínek a následně vyhodnotit, který úhle čela je vhodný, pro jaké řezné podmínky při suchém frézování.

Titan a jeho slitiny patří do kategorie těžkoobrobitelných materiálů tak jako wolfram nebo austenitické a martenzitické oceli. Při obrábění těchto druhů materiálu je obvyklé, že je součást intenzivně chlazena, ale existují případy, kdy je potřeba obrábět bez použití olejových emulzí či chladicí kapaliny, aby nedošlo ke kontaminaci součásti.

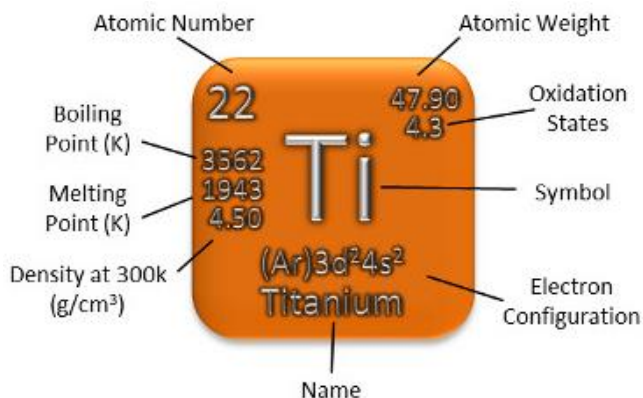
Obrábění titanu a následné experimentální pokusy na těchto slitinách jsou velice žádané díky potenciálu, který tento materiál představuje.

V úvodní části bakalářské práce se budu zabývat historií titanu, z které se posunu na výrobu titanu a rozdělení titanových slitin. Posléze se budu zabývat obráběním z hlediska technologických vlastností, které jsou obrobitelnosti, třecích vlastností, svařitelnosti, tvářitelnosti, a nakonec obecných zásad při obrábění titanových slitin. V závěru této části se budu zabývat frézováním, frézovacími nástroji, vyměnitelnými břitovými destičkami a novodobými trendy při obrábění titanových slitin.

V průběhu experimentu budu cílit na získání všech důležitých informací jako jsou řezné síly, drsnosti a opotřebení na hřbetu destičky. Hlavním aspektem experimentu bude porovnání závislosti řezné síly na úhlu čela destičky, které nastanou při suchém obrábění rovinným frézováním titanové slitiny TiAl6V4. Následně na obrobeném povrchu bude nutné vyhodnotit parametry drsnosti v závislosti na úhlu čela destičky. Nakonec po vyhodnocení těchto informací bude zapotřebí změřit opotřebení na hřbetu destiček při vybraných parametrech. Pro toto porovnání jsem zvolil 5 destiček s různými úhly čela, z čehož jedna byla vybroušena na Nulový úhel čela, díky čemuž tento břit ztratil svůj povlak, ale získal potřebnou geometrii.

2 Titan

Titan je jedním z nejrozšířenějších kovů v zemské kůře, který se vyskytuje v minerálních rudách jako je ILMENIT ($FeTiO_3$ oxid železnato-titaničitý) nebo RUTIL (TiO_2 oxid titaničitý). [1]



Obrázek 1 Titan a jeho složení [3]

2.1 Historie

Tento prvek byl poprvé objevil v roce 1791 Britským chemikem Williamem Gregorem, který se zabýval amatérskou mineralogií. William Gregor tento prvek objevil pomocí rudy ILMENIT, z kterého se mu povedlo vytvořit titan, který v té době pojmenoval Gregor. V roce 1795 byla nalezena ruda RUTIL, z které se povedlo Martinovi H. Klaprothomovi získat stejný kov, který nakonec pojmenoval Titan. Tento kov je vysoce tvrdý, s nízkou hmotností a obdobným vzhledem jako oceli. Od ocelí se liší svojí vysokou odolností vůči korozi, vahou či dokonce pevnostními vlastnostmi čehož se využívá v letectví a Astronautice. [1,2]

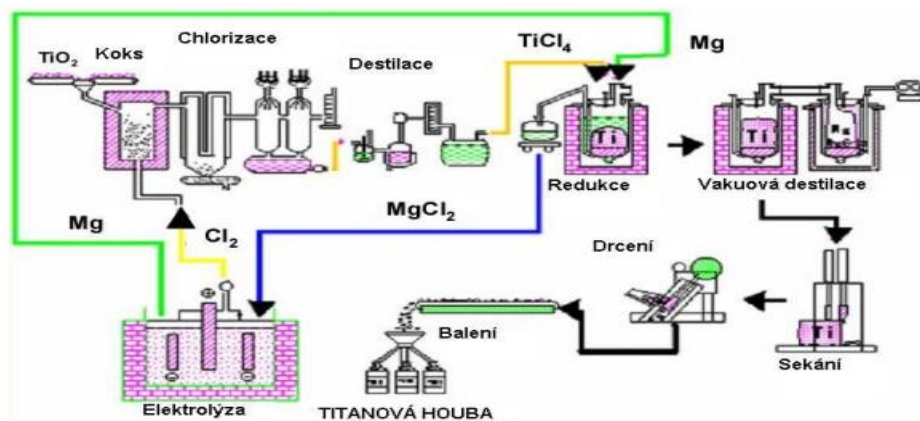
Díky zjištěným vlastnostem titanu, a to zejména jeho tvrdosti a nízké hmotnosti se tento materiál hojně začal využívat v letectví a raketové technice. S tím přišel i rozsáhlý výzkum jeho vlastností a vývoj nejrůznějších slitin. Při vývoji těchto slitin se vypracovalo přes 100 typů slitin, z čehož se pouze pár z nich využívalo pro běžnou výrobu. Postupem času se čistý titan začal využívat v chemickém průmyslu kdežto titanové slitiny se začaly využívat hojně ve strojírenství. V 70. letech minulého století se výroba slitin stabilizovala na určitý sortiment, každopádně výzkum nových slitin nepřestal, především v oblasti práce při zvýšených teplotách. [4]

2.2 Výroba titanu

Obvyklé hutní metody, které se používají při výrobě ostatních druhů kovů jsou v tomto případě výroby titanu vysoce neefektivní. Příčinou je brzká reakce titanu s prvky (O_2 , H, C, N) při zvýšených teplotách, tudíž za nejúčinnější druh výroby se považuje způsob za pomoci rozkladu chloridu titaničitého hořčíkem v argonu při maximální teplotě $950\text{ }^\circ\text{C}$ (Krollův proces) nebo ve vakuu. [5]

2.2.1 Krollův proces:

Tato metoda byla vypracována lucemburským vědcem Wiliamem Justinem Krollem. Poprvé byla tato metoda použita v USA. [5]



Obrázek 2 Schéma výroby titanu Krollovým procesem. [6]

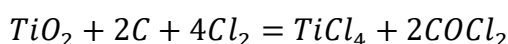
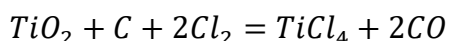
Krollův proces se skládá z těchto **čtyř základních kroků**:

1. příprava materiálu pro chloridaci
2. výroba chloridu titaničitého
3. redukce Titanové houby ($TiCl_4$)
4. přetavení titanové houby na kujný materiál

Poté, co vznikne titan touto cestou (reakcí) je titan tuhá a pórovitá látka, která se po odstranění chloridu hořečnatého a nezreagovaného hořčíku dále čistí. Přetváří se ve vakuových indukčních pecích a stejně tak se tak i odlévají. [5]

2.2.2 Příprava materiálu pro chloridaci

Chlorid titaničitý $TiCl_4$ se v přírodě volně nevyskytuje, a proto je potřeba ho vytvořit. Nejčastěji se pro výrobu $TiCl_4$ využívají dvě suroviny, Rutil a Ilmenitová struktura. Reakční rovnice lze vyjádřit následně:

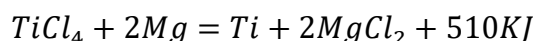


Chlorid titaničitý přechází v páru a v kondenzátorech se jeví jako nažloutlá kapalina. Před samotnou redukcí se chemicky očistí od přidružených kovů (V, Si, Fe) a opět se destiluje. [7,8]

2.2.3 Redukce titanové houby

Chlorid titaničitý ($TiCl_4$) je potřeba redukovat na kovový titan pomocí redukce sodíkem či hořčíkem. Nejčastěji se využívá redukce hořčíkem, která probíhá v kelímcích pod ochranou atmosférou argonu či hélia. Tato metoda spočívá v pozvolném připouštění $TiCl_4$ do roztaveného hořčíku při teplotě 850 až 920°C.

Reakce se dá popsat pomocí následující rovnice:



Po této reakci je zapotřebí nechat vychladnout titanovou houbu v atmosféře inertního plynu. Při reakci vznikne Chlorid hořečnatý ($MgCl_2$) se zbytky hořčíku které je zapotřebí odstranit například pomocí louhování zředěnou kyselinou solnou (HCl) nebo spíše vakuovou destilací. [7,8]

2.2.4 Přetavení titanové houby na kujný materiál

Titanová houba, která nám vznikne při redukcí není vhodná pro další přímé zpracování, a proto je potřeba tuto titanovou houbu převést na ingoty nebo hotové odlitky či polotovary. V případě tavení titanu dochází k velkým potížím při reakci s klasickými prvky (O, H, C, N), dále vysoká teplota tání čistého titanu, a nakonec reakce s materiály dané pece (vyzdívka...) [7,8]

Nejčastěji využívaný materiál pro vyzdívku je grafit, kvůli nízké možnosti obrobení polotovaru, a především díky nízké pořizovací ceně. Velkou nevýhodou u grafitu je, že grafit se rozpouští v titanu, čímž dochází k rapidnímu snížení tažnosti a zvyšování jeho tvrdosti. [7,8]

Ke kujnému titanu se dostáváme pomocí přetavení titanové houby. Při Krollově metodě se využívá elektrická oblouková pec, která je využívána na kompaktní kovy. Při procesu tavení titanu se nejčastěji využívá tavení ve vakuu nebo v atmosféře argonu, kvůli reakcím, které by mohly nastat při střetu s vzdušnými plyny. [7,8]

V současné době se titanové houby přetvářejí ve slitiny titanu v těchto typech pecí [9]:

- Oblouková pec
- Indukční pec
- Elektronová pec
- Plasmová pec

V dobách před rokem 2000 byly hojně využívané obloukové a indukční elektrické pece pro tavení slitin titanu kvůli nízkým možnostem tváření tohoto materiálu.

V případě **elektrické obloukové pece** se jedná o tavení, které je prováděno ve vakuu kvůli titanu a jeho schopnostem reagovat s plyny v okolí. Tato metoda se provádí pomocí elektrického oblouku. Blíže se jedná o oblouk, který hoří mezi titanovou elektrodou a titanovou houbou. Díky teplu, které vzniká na dně krystalizátoru pece, se houba přetváří na taveninu a oblouk tak hoří pouze mezi titanovou taveninou a elektrodou. [10]

Tato metoda pomocí **Elektrické indukční pece** se využívá především pro výrobu odlitků a pro zpracování recyklovaného titanu. Princip při tváření je obdobný až na rozdíl volby elektrody. Při tváření v Indukční peci se využívá netavná elektroda (uhlíková či wolframová), které nám poskytují stabilní oblouk. Tento oblouk hoří mezi titanovou taveninou a elektrodou a do tohoto oblouku se postupně přidávají kusy titanu. [10]

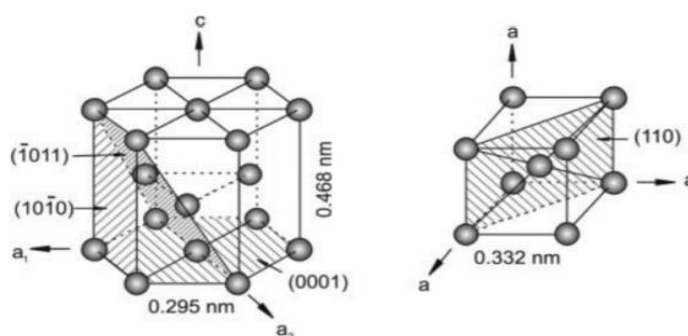
Mezi modernější metody tavení se řadí tváření pomocí elektronových paprsků a taktéž pomocí plazmy.

V **Elektronové peci** se využívají svazky elektronových paprsků, které dopadají na materiál. Ten se za pomoci vysoké kinetické síly elektronů zahřívá. Využívají se vakuové pece z důvodu toho, že pohyb elektronů je dosažen pouze v kvalitním vakuu. Jedná se o nejefektivnější způsob získání kvalitního kovu, v tomto případě kvalitní slitině titanu. [9]

Plazmová pec pracuje tak, že do plazmového hořáku se přiváděné molekuly argonu ionizují a při styku s kovem se opět slučují. Při procesu slučování dochází ke značnému nárůstu tepla, které se převádí do taveného kovu. [9]

2.3 Technicky čistý titan

Titan je polymorfním kovem, který má dvě alotropické modifikace. Při teplotě 882 °C se fáze α HCP (s hexagonální mřížkou) transformuje na fázi β BCC (s mřížka kubická, prostorově středěná) a jeho stabilita sahá až do teploty bodu tání, což je 1668 °C. Při těchto transformacích dochází k obměně struktury, a to má za důsledek změnu technologických a mechanických vlastností. Schématické struktury mřížek HCP a BCC jsou uvedeny na obrázku 3. Ve vyšrafovaných rovinách je znázorněna oblast výskytu nejvíce obsažených atomů. [1, 11]



Obrázek 3 Krystalické mřížky fázi alfa a beta [1]

Mezi jeho přednosti se řadí v porovnání s ocelí jeho nízká hustota ($\rho = 4,55 \text{ g/cm}^3$), střední pevnost v tahu (400MPa), vysoká pracovní teplota (250-500 °C), kde už není možné využít kovy jako je hliník nebo Měď a nízkým součinitelem tepelné vodivosti

($21,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Dalším kladným znakem je vynikající korozní odolnost zejména vůči chlóru, chloridovým sloučeninám nebo kyselinám, kde ostatní kovy či slitiny neodolávají, a tak je titan vhodnou volbou pro využití v chemicky náročném prostředí jako náradí nebo pro zařízení, která jsou v přímém kontaktu s mořskou vodou. Tyto korozní odolnosti jsou zapříčiněny díky rychlé oxidaci, na povrchové vrstvě titanu, kde se vytváří pasivní vrstva, která tak zabraňuje nepříznivým vnějším vlivům i za zvýšených teplot. V porovnání s ostatními kovy má titan nízkou odolnost proti opotřebení a vysoký koeficient tření (0,65 až 0,68). [4, 11]

Jako hlavní nedostatek titanu se řadí vysoká pořizovací cena (až 8x více nežli u hliníku), což je způsobeno nežádoucí reakcí titanu s (O_2 , H, C, N) při zvýšených teplotách. Řeší se to pomocí odlévání ve vakuu nebo ochranné atmosféře argonu, což koreluje s vysokou pořizovací cenou. Dalším nedostatkem je relativně nízký modul pružnosti v tahu, který činí 115 GPa a špatná recyklace odpadu ve větším množství. [4, 11]

2.4 Titanové slitiny

Po zjištění pozitivních vlastností čistého titanu se začalo s výzkumem, jak by se dalo využít těchto specifikací a tím zlepšit mechanických, chemických a fyzikálních vlastností, a to přidáním dalších doprovodných prvků a tím vytvoření slitin na bázi titanu. Ačkoli vývoj titanu stále probíhá, stále se jedná o zvláštní způsoby využití těchto slitin.

Titanové slitiny se dělí dle struktury základních fází v rovnovážném stavu a složení závislé na legujících prvcích, které mají různou rozpustnost v různých fázích čímž je ovlivněna jejich transformace.

A to jsou:

- slitiny α
- slitiny pseudo α ($p\alpha$)
- slitiny $\alpha + \beta$
- slitiny pseudo β ($p\beta$)
- slitiny β

2.4.1 Slitiny α

Slitiny α má za nejvýznamnější stabilizující prvek z oblasti kovů hliník, a to s maximální rozpustností do 26 %, avšak je tato hodnota omezena na 7 %. dalšími stabilizujícími prvky jsou zde zirkon, cín, uhlík, kyslík a dusík. Slitiny α jsou známé dobrou pevností, odolností proti křehkému lomu při velmi nízkých teplotách, a to až do -200°C . Při teplotách nad 600°C jsou schopné odolávat vysokoteplotní oxidaci. Tyto slitiny jsou dobře svařitelné a obrobitelné, kdežto ohledně tvárnosti za studena omezené v závislosti na obsahu hliníku. Jejich hlavním nedostatkem je vysoká vodíková křehkost. Mezi nejčastější materiál se fází α je TiAl5Sn2,5 [4, 11]

2.4.2 Slitiny pseudo α ($p\alpha$)

Slitiny pseudo α jsou obdobné jako jsou slitiny α s rozdílem, že mají kromě fáze α také fázi β , která je obsažena menším množstvím (2-8 %). Díky přidání fáze β se materiál stává méně citlivý vůči vodíkové křehkosti a k tomu se zlepšuje jeho plasticita. Hliník má zde vysoký vliv na pevnosti materiálu, kde při 1 % hliníku materiál dosahuje pevnosti 500 MPa kdežto při využití 7 % hliníku nabývá materiál pevnosti až 1200MPa. Nejčastějším materiálem s fází pseudo α je ruská slitina VT20 [4, 11]

2.4.3 Slitiny $\alpha + \beta$

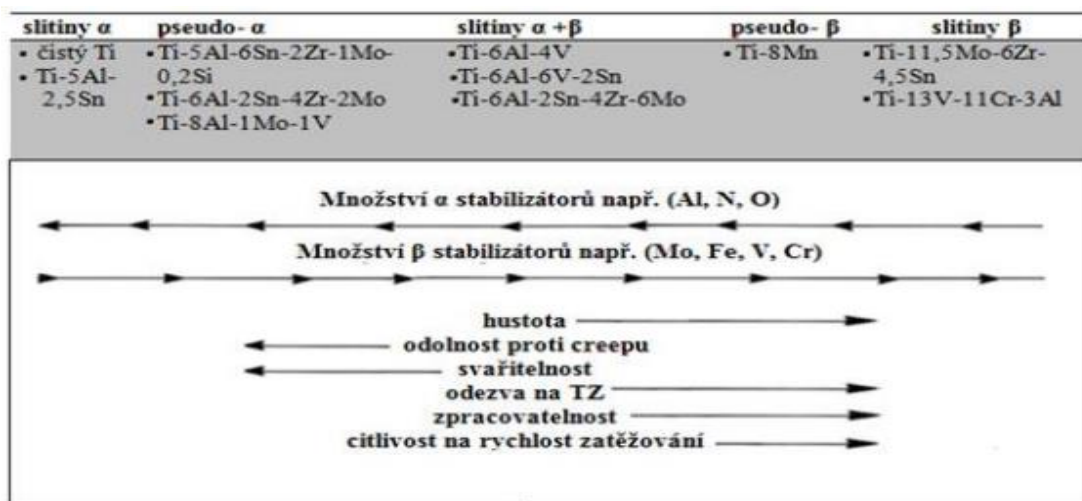
Tyto slitiny mají velkou škálu struktur, kde poměr fází je dán charakterem rovnovážného diagramu, obsahem legujících prvků a podmínkami zpracování. Mezi hlavní morfologické typy struktury této slitiny se řadí rovnoosá zrna nebo lamely obou tuhých roztoků, popřípadě kombinací těchto morfologií. Tyto slitiny jsou tepelně vytvrditelné, a ve srovnání s fází α a pseudo α je zajištěna lepší tvárnost v žíhaném stavu, lepší odolnost vůči únavě či namáhání a poměrně velká pevnost při teplotách okolí, která se snižuje s rostoucí teplotou. Jejich svařitelnost a odolnost proti tečení je znatelně horší nežli u jednofázových struktur. Tyto slitiny jsou nejčastěji používány, což mě vede ke slitině TiAl6V4 , na který se spotřebuje až 50 % veškeré produkce titanu. [4, 11]

2.4.4 Slitiny pseudo β ($p\beta$)

Slitiny Pseudo β jsou známé vysokou pevností, houževnatostí a dobrou tvárností (po vyžhání). Tyto slitiny mají obsah legujících prvků do 18 %, z čehož 2 % jsou železo či chrom, které tvoří intermetalické fáze. Obsah hliníku se pohybuje do 3 %. [4, 11]

2.4.5 Slitiny β

Slitiny β mají vysoký obsah legujících prvků, který dosahuje až 20 %, což zvyšuje jejich měrnou hmotnost oproti zbylým fázím. Tyto slitiny jsou známé vysokou pevností, odolností proti korozi, dobrou tvárností, lepší lomovou houževnatostí oproti předchozí fázi $\alpha + \beta$ ale nízkým modulem pružnosti a špatnou svařitelností. Výroba těchto slitin je velmi obtížná a nákladná. Mezi nejčastější materiál s fází β je TiAl3Mo8Cr11. [4, 11]



Obrázek 4 Schematické porovnání slitin s různými fázemi [5]

2.5 Slitina TiAl6V4

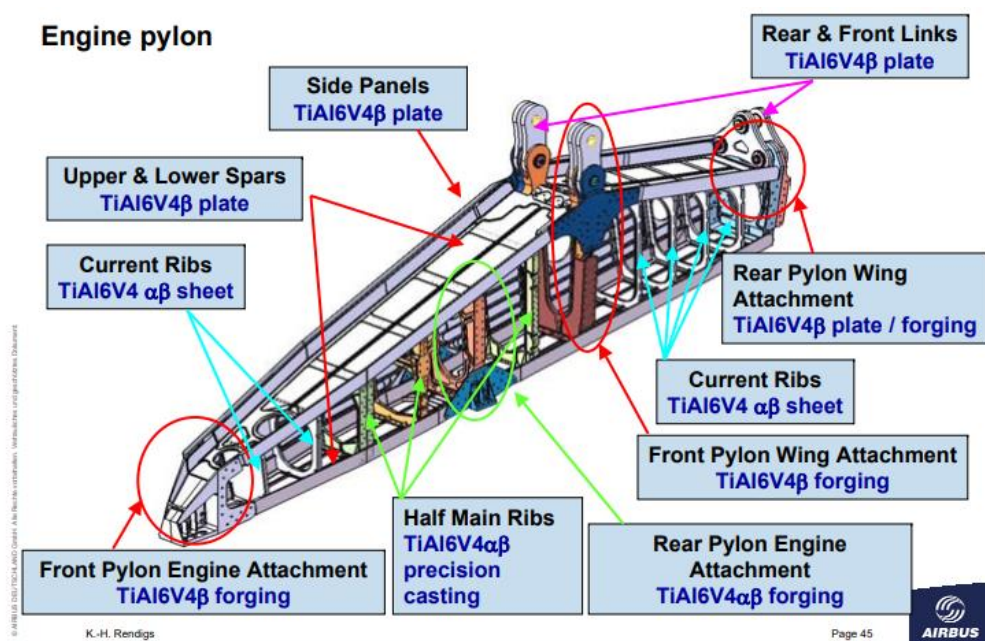
Je to nejrozšířenější slitina se strukturální fází $\alpha + \beta$. Je vysoce pevná slitina s nízkou tvrdostí, která poskytuje velmi dobré vlastnosti v poměru pevnosti ku hustotě. Ve srovnání s ostatními titanovými slitinami je tato slitina snadno dostupná. Taktéž vykazuje velmi dobré výsledky únavové pevnosti, odolnosti vůči vzniku či šíření trhlin při práci za vlhkých podmínek. Vzhledem k tvorbě husté oxidové vrstvy $TiAl_6V_4$ poskytuje korozní odolnost v oxidačním prostředí. V případě poškození vzniká nový růst oxidační vrstvy, pokud je přítomen kyslík. Tato slitina je vytvrditelná až na 1100 MPa až do tloušťky 25 mm. Použitelnost této slitiny je v rozmezí (-210 až 400) °C, a z hlediska profilů se jedná o desky, tyče, výkovky a plechy. V tabulce níže lze vyčíst chemické složení slitiny TiAl6V4. [12]

Tabulka 1 Chemické složení slitiny [12]

	Fe	C	N	O	H	Al	V	Ti
TiAl6V4	≤ 0,30	≤ 0,08	≤ 0,05	≤ 0,2	≤ 0,015	5,50- 6,75	3,50- 4,5	zbytek

2.5.1 Využití této slitiny

Tato slitina je využívána ve všech odvětví od lékařství pro je biokompatibilitu s lidskou tkání jako jsou například dentální implantáty, kloubní komponenty nebo kostní šrouby. Dalším odvětvím je chemický průmysl, kde se tyto slitiny využívají pro jejich odolnost vůči korozi ve vysoce agresivních prostředích, a proto se můžou využívat jako výstelka pro nádrže nebo u tlakových bomb. Pro úsporu hmotnosti a vysoké pevnosti se TiAl6V4 využívá v automobilovém průmyslu pro komponenty či celé díly pro závodní průmysl, jako je například převodovka u fórmule, nebo pružinové ventily u motoru závodních aut. Nakonec nejdůležitější letecký průmysl. V leteckém průmyslu se slitina využívá pro svou vysokou pevnost. Využívá se téměř na všechny části letadla, ať už se jedná o blok motoru, trup nebo podvozek letadla. Na obrázku č. 5 lze pozorovat nosná část motoru. [13]



Obrázek 5 Nosná část motoru Airbus 380 [14]

3 Obrábění

Obrábění je technologický proces, při kterém pomocí úbytku materiálu (odebírání třísek) dosahujeme předepsaného rozměru, tvaru či stupně přesnosti dle norem čímž zlepšujeme mechanické a fyzikální vlastnosti povrchu dále zlepšujeme vzhled povrchu a také snižujeme zbytkového pnutí v povrchové vrstvě obrobku. [1]

3.1 Technologické vlastnosti titanu

Při zpracování titanu, jsou důležité nejenom mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti ale také technologické, které nám slouží ke správné činnosti a spolupráci (Stroj, nástroj, obrobek.). Jedná se o vlastnosti, které se nedají samostatně popsat předešlými definicemi, a tak jsou předepsané a stanovené normou. [7]

Obrobitelnost je definovaná jako míra schopnosti materiálu být zpracovaná pomocí jedné z vybraných metod obrábění. Z toho vyplývá, že je to vlastnost daná materiálem a nezávisí pouze na obráběném materiálu, ale také na způsobu obrábění a rezných podmínkách. Základní rozdělení obrobitelnosti se dělí dle materiálu viz tabulka 2. [1]

Tabulka 2 Rozdělení obrobitelnosti dle materiálu

Skupina	Materiály
a	Litiny a nekovové materiály
b	Oceli a oceli na odlitky
c	Barevné kovy
d	Lehké kovy

Při běžných metodách třískového obrábění jako je například frézování, soustružení nebo vrtání se setkáváme s problémy, které vyplývají z unikátních vlastností materiálu. U titanu se jedná o:

- Nízký modul pružnosti v tahu (115GPa) zapříčiňuje vysoké odpružení obrobku při obrábění (když břit vniká do obrobku). [5]
- Malá tepelná vodivost čistého titanu ($21,9\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), malá styková plocha při obrábění a vysoký koeficient tření (0,65-0,68) mají za následek vysokou kumulaci energie, což značí nárůst teploty v oblasti špičky nástroje nad 1000 °C, čemuž nepomáhá ani tvar třísky při odvodu, protože plocha mezi nástrojem a obrobkem je příliš malá. [5]

- Relativně malá tvrdost, vysoká pevnost a vyšší chemická reaktivnost (pohlčení kyslíku a dusíku při ohřevu v místě tvořící se třísky) způsobuje zvýšenou možnost zadírání a vytrhávání materiálu nástrojem a tím dochází zároveň k rychlému otupení nástroje, k čemuž přispívá i velký součinitel tření samotného titanu. Při porovnávání soustružení a frézování, je větší problém při frézování obzvláště kvůli zadržování. [5]
- Při nevhodně zvolené geometrii břitu se částičky titanu navařují na břit nástroje. [5]
- Pro frézování se dříve využívali rychlořezné oceli, jež nahradili slinuté karbidy (SK) na bázi karbidu wolframu s kobaltem, které se hojně využívají pro soustružení nebo také stellite (slitina chromu a kobaltu), která mohou obsahovat prvky jako Molybden, Uhlík nebo Wolfram. [5]
- V případě pokusu, o využití chladících kapalin, které se používají v běžné výrobě pro oceli, se došlo k výsledku, že účinnost mazání a chlazení při obrábění titanu či titanových slitin je velice nízká. [5]

Z toho můžeme vyvodit, že titanové slitiny spadají do těžkoobrobitelných materiálů.

Tabulka 3 Porovnání konstrukční oceli se slitinou Titanu TiAl6V4 [12, 15]

Materiál	Hustota $\rho [kg \cdot m^{-3}]$	Tepelná vodivost $\lambda [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita $c [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Teplota tavení $t [^{\circ}C]$	Modul pružnosti $\sigma [GPa]$
Ocel	7850	47,0	461	1668	210
Titan	4420	11,4	526	1630-1650	114

3.1.1 Třecí vlastnosti

Třecí vlastnosti nejsou nijak dobré pro titan a jeho slitiny. Tato vlastnost je popsána třemi veličinami, a to otěr, součinitel tření a náchylnost k zadírání. [7]

Otěr je u titanových slitin veliký a má za důsledek při obrábění přechod prvků z nástroje (VBD) na obrobek. Při obrábění se otěr břitu dělí na adhezní, difúzní a brusný otěr. [7]

Brusný – Podstatou tohoto druhu otěru je, že měkčí části nástrojového materiálu jsou odlupovány a díky tvrdším prvkům obráběného materiálu. Je dán především tvrdostí břitu nástroje. Nejčastěji k tomu dochází při nízkých řezných rychlostech. [7]

Adhezní – Podstatou tohoto otěru je těsný spoj mezi obrobkem a břitem nástroje kdy vzniká bodový charakter styku. Je velmi podobný brusnému otěru. [7]

Difúzní – V podstatě k tomuto typu otěru dochází při dosažení určité teploty, kdy přechází prvky z materiálu břitu/monolitního nástroje na obráběný materiál. Nejčastěji se jedná o obrábění nástrojem ze slinutého karbidu, kde přechází karbidy do obráběného materiálu a tím dochází ke změně chemického složení na povrchu obráběného materiálu. [7]

Náchylnost k zadírání je na rozdíl od ostatních kovů u titanu velice vysoká, díky své afinitě ke kyslíku. Pro zlepšení podmínek při obrábění je dobré použít nějakou chemickou úpravu například nitridace. [7]

Součinitel tření je koeficient, který je u titanu v porovnání s ostatními kovy vysoký (0,65 až 0,68). Díky tomu, že titan nemá dostatečně dobrou absorpci molekul běžných maziv, je škála užitečných maziv velmi malá. Jako nejčastější druh maziva je považován grafit nebo sirník molybdeničitý. I přesto, že se tyto maziva vyznačují svou vysokou účinností, tak to není pro mazání třecích ploch dostatečné pro materiál. V dalším případě se dá snížit součinitel tření pomocí tepelného zpracování. [7]

3.1.2 Svařitelnost

Pokud bude svár dokonale krytý, pomocí ochrany atmosférou, je svařitelnost zaručena. Díky tomu, že má titan vysokou afinitu ke kyslíku, tak není možné svařovat pomocí plamenu, svařovat pod tavidlem obsahuje-li kyslíkaté sloučeniny ani obalenými elektrodami. Nejčastěji použití je v argonu s wolframovou tavnou/netavnou elektrodou. Velice obtížné je svařování titanu díky jeho fázovým přeměnám a fyzikálním vlastnostem (vysoká teplota tání, velmi nízká tepelná vodivost...) a tudíž je velmi obtížné svařovat titan s jinými kovy. [7,16]

3.1.3 Tvářitelnost

U titanu především závisí na chemickém složení podmínkách, za kterých se titan tváří (Deformují) a struktuře daného materiálu. Z pohledu porovnání čistého titanu a jeho slitin je zřejmé, že z převážné většiny slitin titanu, je velká problematika s tvářením za studena díky tomu, že v těchto slitinách jsou podpůrné prvky (Legury) které tuto tvářitelnost snižují. Čistý titan má tvářitelnost dobrou za tepla i za studena. [7,16]

3.1.4 Obecné Zásady při obrábění

Díky charakteristice, která byla popsána v části obrobiteľnosť je zřejmé, že existuje spousta veličin, díky kterým se dá popsat titan jako těžkoobrobiteľný materiál, a tudíž se s ním tak musí pracovat. Když zavedeme několik zásad, které budu dodržovat při obrábění titanu, pak můžeme zefektivnit výrobu a tím i životnost obráběcího nástroje.

Použití správné chladicí emulze je zapotřebí vzhledem k odvodu tepla z místa řezu, které je ovlivněno vysokým koeficientem tření. Tuto operaci zavádíme, aby docházelo ke správnému odvodu třísky, snížení řezných sil a v neposlední řadě také k prodloužení trvanlivosti nástroje. Preferuje se užití emulze před vodním roztokem či minerálními oleji. V případě užití emulzí s obsahem halogenu je potřeba po obrobení důkladně omytí součástky, z důvodu zvýšené pravděpodobnosti napadení koroze. Z tohoto důvodu se nedoporučuje k obrábění těchto druhů slitin. [5]

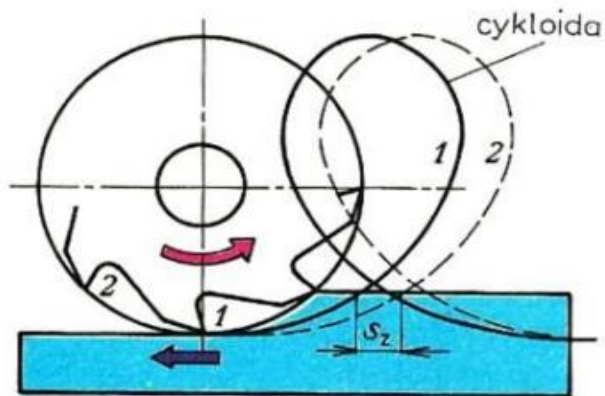
Zaručení tuhosti soustavy a ostrý nástroj je potřeba ve všech možných druzích obráběcích technologiích kvůli přesnosti a preciznosti výroby. V případě zajištění co nejvyšší tuhosti soustavy se nám dramaticky sníží chvění při obrábění, a to způsobí vyšší přesnost řezu. Nástroj, který využijeme pro tento druh obrábění by měl být ostrý s pozitivní geometrií břitu, velkým úhlem čela a nízkou drsností na čele, aby se odvedená tříška nelepila na břit nástroje, a tak se dosáhlo požadované jakosti povrchu. [5]

Použití nižších řezných rychlostí k docílení toho, aby nedocházelo ke zvýšeným teplotám na břitu nástroje, a tudíž difúznímu tření kvůli kterému by atomy břitu přecházely na obráběný materiál čímž by docházelo k poškozování břitu, a to by způsobovalo snížení životnosti nástroje. [5]

Nezastavovat stroj popřípadě nástroj, když jsou ve vzájemném kontaktu. V případě, když zůstane nástroj a obrobek v kontaktu při ukončení procesu obrábění nebo při jejím počátku, je velká pravděpodobnost, že dojde k poškození nástroje nebo dokonce až ke zničení nástroje. [5]

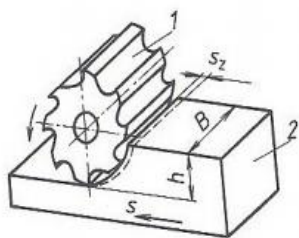
4 Frézování

Když se řekne slovo frézování, jedná se o vnitřní a vnější třískové obrábění rovinných či tvarových ploch, kde hlavní řezný pohyb vykonává nástroj (fréza) a vedlejší přímočarý či kruhový pohyb provádí obrobek. Výsledným řezným pohybem zubu nástroje (frézy) je tedy cykloida která je znázorněna na obr. 6. [17]

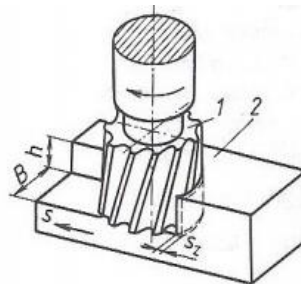


Obrázek 6 Schéma vzájemného posunutí nástroje s obrobkem [17]

Základní rozdělení frézování je na čelní frézování a vřecí frézování. Rozdíl je v použití ploch a ose rotace, kdy při čelním frézování řeže současně na obvodě i na čele kdežto u vřecího frézování řeže fréza pouze na obvodě což je znázorněno na obrázku 7. [18]



Obr. 4.26. Frézování obvodem vřecí frézy
1 – fréza, 2 – obrobek, B – šířka obrobku, h – hloubka řezu, s – posuv, s_z – posuv na zub



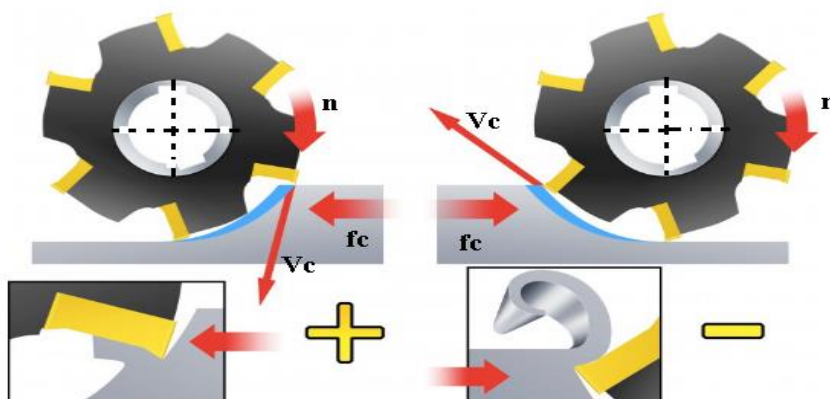
Obr. 4.27. Frézování čelem čelní frézy
1 – fréza, 2 – obrobek, B – šířka obrobku, h – hloubka řezu, s – posuv, s_z – posuv na zub

Obrázek 7 Frézování čelní a obvodové [18]

Dále se frézování dělí dle směru otáčení, a to na sousledné a nesousledné.

Na Válcovém fréze se dá bohatě znázornit, zda se jedná o sousledné či nesousledné frézování, které je ukázáno na obrázku 8.

Při sousledném frézování dochází k tomu, že břit nástroje frézuje od nejširšího průřezu třísky, která se postupně přechází do bodu, kdy tříska dosahuje nulové hodnoty. Při tomto druhu obrábění dochází k silovým rázům, u každého zubu, což se zmírňuje tím, že se použije fréza se šikmými zuby. Tento směr frézování se využívá u měkkých či houževnatých materiálů. [19]



Obrázek 8 Sousledné a nesousledné frézování [19]

V případě nesousledného frézování dochází k tomu, že se průřez třísky postupně zvětšuje z čehož nám vyplývá, že se rychleji otupuje nástroj. V začátku řezu fréza prokluzuje a dochází k tomu, že obrobená plocha má horší jakost povrchu, proto se nejčastěji používá pro obrábění výkovků, odlitků či vylisků s nečistým či tvrdým povrchem. [19]

Mezi nejčastější parametry ovlivňující životnost nástroje jsou řezná rychlost (V_c), hloubka řezu radiální (a_e), hloubka řezu axiální (a_p), posuv na zub (f_z) a počet zubů (z) viz obrázek 9. [33]



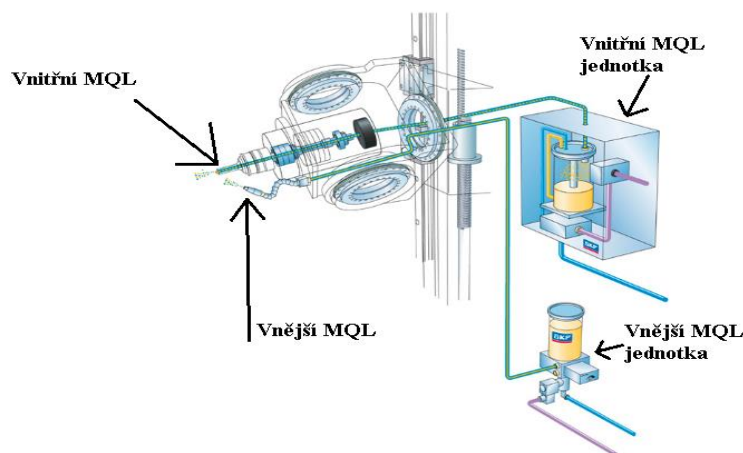
Obrázek 9 Parametry ovlivňující životnost nástroje [33]

5 Obrábění těžkoobrobitelných materiálů

V těchto případech nestačí chlazení stlačeným vzduchem ani žádnou klasickou chladicí kapalinou z důvodu špatné účinnosti chlazení a zároveň zde hledají výrobci a koncoví uživatelé snahu o snížení výrobních nákladů a ekologičnost výroby. Z toho důvodu se využívají technologie, které nám značně zvyšují účinnost při obrábění a snižují tím dopad na životní prostředí a náklady na výrobu. Mezi tyto technologie patří mazání (Aerosol + malá vrstva oleje) a HSC (High speed cutting). [20]

5.1 Mazání

Jedná se o systém mazání od firmy SKF, která má svůj vlastní systém mazání SKF LubriLean, který spočívá v tom, že zařízení má za úkol dodávat minimální množství maziva (MQL) do aktivních míst mezi nástroj a obrobkem při řezných operacích anebo taktéž při tváření či válcování. Tato technologie se dělí na vnitřní MQL a vnější MQL, kde u vnitřního způsobu mazání je stlačený vzduch nebo aerosol přidáván vřetenem, držákem nástroje a nástrojem přímo k místu styku nástroje s obrobkem. Při vnějším způsobu mazání je aerosol přiváděn vnější tryskou. V případě nedodání této technologie mazání je možné se správnou odbornou znalostí tyto obráběcí stroje modernizovat, a tudíž přidat tuto technologii. [21]

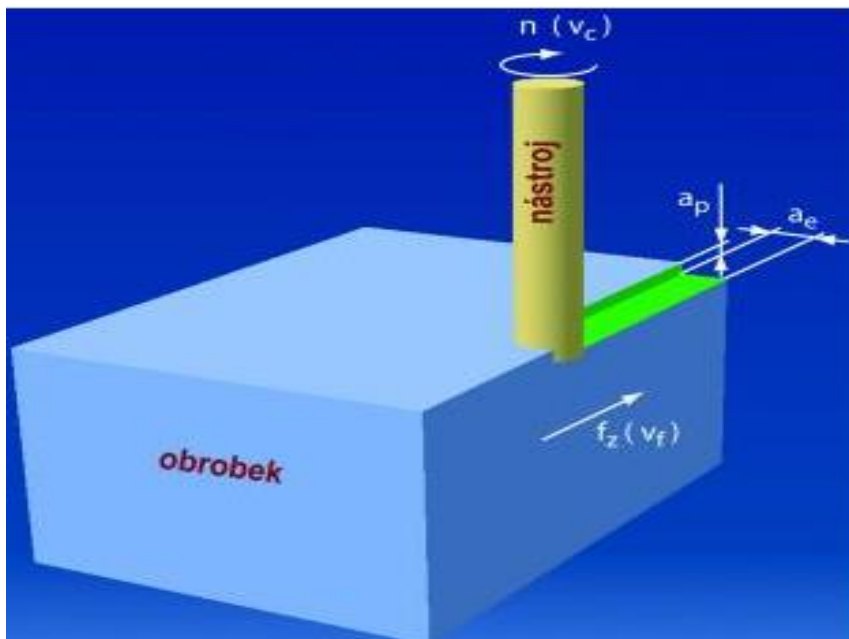


Obrázek 10 Technologie MQL pro vnější a vnitřní užití [21]

V dnešní době je snahou odstranit chladicí emulze na bázi oleje či chladicí kapaliny z ekologického hlediska, a dokonce z hlediska finančního. Z hlediska ekologického se jedná o to, že se olej dostává do zeminy, a tudíž se pak zemina stává infikovanou. Z pohledu finančního se jedná především o zakoupení a likvidace chladiva.

5.2 Vysokorychlostní obrábění

Podstatou tohoto typu obrábění je zvyšování řezných a posuvových rychlostí kde cílíme na zvýšení podílu tepla odvedeného třískou, a naopak snížení tepla odvedeného nástrojem a obrobkem. Pro čistý titanové leží oblast pro optimální volbu řezných rychlostí $v_c = (120 \text{ až } 1000)m.min^{-1}$ a u jeho slitin se pohybujeme $v_c = (40 \text{ až } 300)m.min^{-1}$.



Obrázek 11 Frézování obrobku [20]

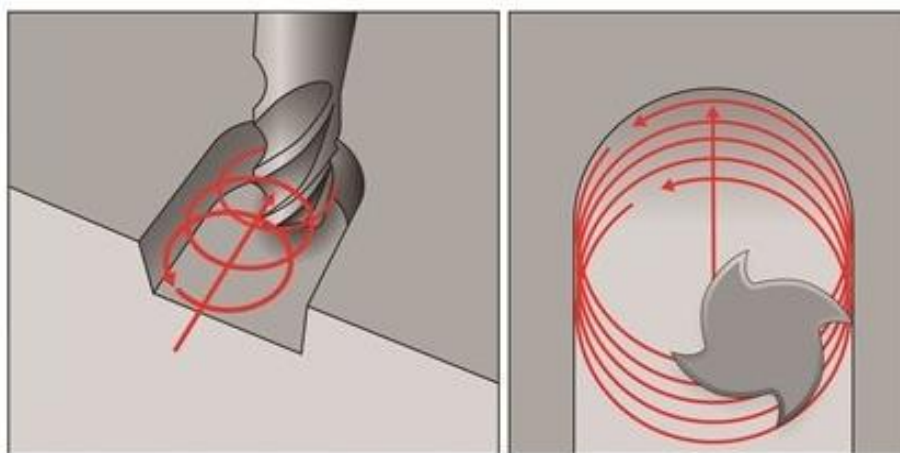
Kvůli značnému opotřebení nástroje při zvýšení řezných rychlostí je vhodné nalézt experimentálně křivku produktivity obrábění ve vztahu k celému rozsahu doporučených řezných podmínek pro daný nástroj. Když vezmeme v potaz materiál TiAl6V4, který má nízký modul pružnosti, nízkou tepelnou vodivost a hexagonální těsně uspořádanou mřížku tak je zřejmé, že tyto vlastnosti mají velký vliv na zhoršení obrobiteľnosti této slitiny. Navíc při teplotách nad 600 °C dochází ke zpevnění vrstvy, na které vzniká tvrdá vrstva kysličníků. Z tohoto důvodu je doporučeno použití nižších řezných rychlostí a to $v_c = (30 \text{ až } 80)m.min^{-1}$ a umělého řezného prostředí, nejčastěji ve formě emulzí standardních koncentrací (5 % až 10 %). [20]

Kvůli tomu, že vysokorychlostní obrábění zkracuje životnost nástroje, tak se dlouhou dobu zjišťovalo, jak tuto dobu trvanlivosti nástroje zvýšit a taktéž snížit dobu obrábění. Laboratorními pokusy se dospělo k tomu, že životnost nástroje by mohla být prodloužena, díky různým změnám trajektorie nástroje, a tak se dospělo k tomu, že se vyvinula technologie Trochoidního frézování. [20]

5.2.1 Trochoidní frézování

Tato technologie je vhodná pro výrobu drážek o větší šířce, nežli je nástroj. Jedná se o metodu pro HSC s velkým úběrem materiálu.

Trochoidní frézování lze definovat jako frézování po kruhové interpolaci, které současně zahrnuje i posuv vpřed v radiálním směru (Spirálová dráha), kdy se využívá velkých axiálních hodnot hloubky řezu (až 2,5 průměru nástroje), kdežto nižších radiálních hodnot hloubky řezu (max. 0,1 průměru nástroje). Tato technologie vyžaduje speciální programy CAM systému, které tuto strategii podporují. Tato strategie je vhodná pro hrubovací až polodokončovací operace obrábění hlubokých drážek, kapes či dofrézování zbytku po předchozí operaci. Strategie trochoidního frézování je v porovnání s běžnými metodami frézování drážek či dalších ploch bezpečnější a dovoluje zvýšení trvanlivosti nástroje a tím zvýšit produktivitu výroby a snížit náklady na nástroje, protože není potřeba využívat nástroj průměru 16 mm, který je dražší, když se může využít nástroj o průměru 10 mm. Tato strategie je výhodná pro všechny CNC centra, kvůli nižším požadavkům na výkon, kdyžto vyšším požadavkům na posuv a otáčky. [22]



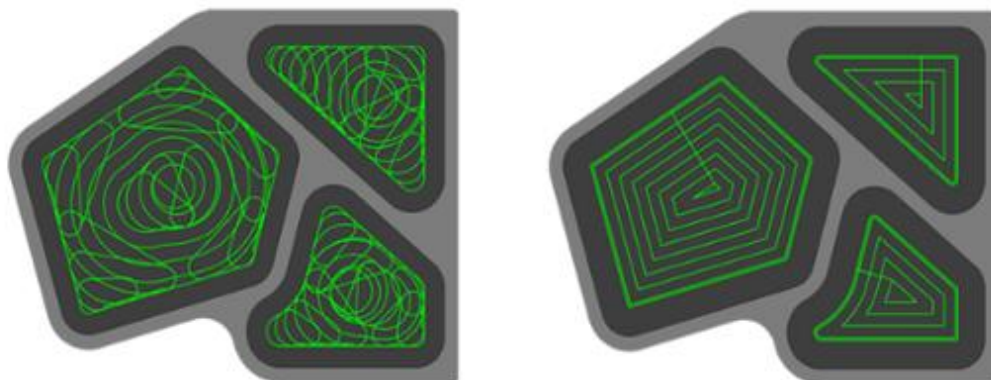
Obrázek 12 Schéma pohybu při trochoidním frézování [22]

Mezi největší výhody trochoidního frézování patří:

- úspora času a snížení řezných sil,
- pokles zatížení nástroje a hlubší řez nástroje,
- efektivnější využití řezných břitů,
- větší přesnost obrobku a lepší odvod třísek.

5.2.2 Truemill

Je to doplňková součást systému SurfCAM, je to patentovaná technologie, která nám přináší revoluční technologii v oblasti třískového obrábění. Tato technologie přizpůsobuje dráhu nástroje tak, aby úhel styku nástroje s materiálem nepřesáhl maximálně povolenou hodnotu 120° . U této technologie dochází k odlišným drahám nástroje, než je u ostatních vidět u ostatních hrubovacích drah. Všechny rohy a ostré změny směru v dráze nástroje jsou odstraněny. [23]



Obrázek 13 Technologie Truemill (obrázek na levé straně) běžná technologie (obrázek na pravé straně). [23]

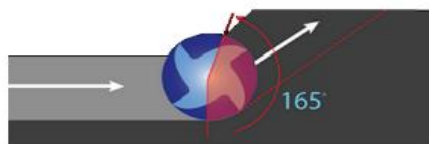
Po zavedení této technologie lze zvětšit hloubku řezu, zrychli se úběr materiálu, přibližně 10x se zvýší životnost nástrojů a až o 80 % se sníží čas při obrábění a to nám zaručí zvýšení produktivity stroje.

Úhel styku nástroje je definován v tomto případě 120° . [23]



Obrázek 14 Technologie Truemill [23]

Při překročení tohoto úhlu se technologie Truemill přizpůsobí proporcím obráběné součásti, a tak nikdy nepřekročí nastavený úhel styku nástroje s materiálem. [23]



Obrázek 15 řešení problematiky [23]

6 Suché obrábění

Jedná se o ekologický trend, kdy se při soustružení, frézování a vrtání odstraňuje technologie chlazení při využití chladící kapaliny a chladící emulzí, při kterém dochází k chlazení součástky a nástroje což je velice výhodné z pohledu teplot, ale z ekonomického a ekologického hlediska nevýhodná. Pro začátek se snižuje trvanlivost nástroje při využití chladícího média kvůli kolísání teplot na povrchu, dále chladící médium je potřeba zakoupit, jakmile se využije je možnost jej využít znovu ale pouze v omezeném počtu cyklů, na konci je chladivo znečištěné, a proto je potřeba zakoupit nové chladící médium. Je zřejmé, že ne každé obrábění lze uskutečnit bez použití řezné kapaliny. Odhadem se dá konstatovat, že v případě nepoužití chladícího média klesnou náklady na obrobení o 10 až 15 %. Tento typ obrábění se využívá především při obrábění optických skel, při kterých je nežádoucí využívat chladící kapalinu kvůli znečištění povrchu. [32]

6.1.1 Výhody:

- Nižší náklady na obrábění.
- Odstranění pořizovacích a likvidačních nákladů na kapalinu.
- Není potřeba stroj pro manipulaci a čištění média.
- Ochrana životního prostředí a zdraví pracovníka.
- Větší produktivita obrábění.
- Prodlužuje životnost nástroje

6.1.2 Nevýhody:

- Vyšší teploty při obrábění
- Větší opotřebení destičky

6.2 Nástroje pro frézování

Mezi základní předpoklady pro frézování patří správná volba nástroje. Tento nástroj by měl být schopný obrobek daný profil polotovaru do výsledných rozměrů a vlastností. K tomu je důležité zvolit vhodné řezné podmínky, stroj, který dokáže tyto podmínky splnit, a nakonec řezné prostředí, které nám může redukovat mnoho problémů při obrábění, které plynou z materiálu dané slitiny. Kvůli problémům, které obnáší titan a jeho slitiny je třeba zvolit vhodný řezný materiál pro frézování, který bude rovněž povlakován.

V mém případě se bude jednat o frézování titanu, kde je vhodné využívat především frézy s VBD nebo se dá zvolit monolitní frézy při nižších rozměrech. VBD pro obrábění titanu se nejčastěji vyrábí ze slinutého karbidu pomocí práškové metalurgie vzhledem k následující operaci spékání karbidů, na které se nanese povlak dalšího materiálu, který zlepšuje jeho povrchové mechanické vlastnosti. [24]

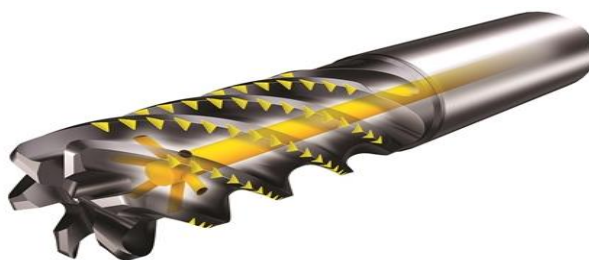
Kvůli tomu, že má titan velmi nízkou vodivost, a tak sníženou schopnost přestupu tepla do nástroje je nevhodné využívat povlaky CVD, kvůli tomu, že se tento povlak nanáší na danou destičku, ale nekopíruje její geometrii tak, jako PVD. Nejčastějším problémem při obrábění titanu je ten, že při obrábění se kumuluje energie a tím se to zahřívá a při vysokých teplotách má titan tendenci reagovat s prvky z povlaku a tím dochází ke tvorbě nárůstku na řezné hraně. [24]

Mezi jednu z inovací, která prošla značnou změnou byla obměna nástrojů, které se využívají pro obrábění slitin titanu. Začalo se s tím, že se v laboratořích hojně využívaly odlišné geometrické úhly. V roce 2014 společnost **Seco** zjistili, že se dá využít i různých povlakování, které by byly vhodné přímo pro obrábění slitin titanu. Jedna z řad nástrojů, která se dostala do popředí byla řada MS2050 viz obrázek 16., která využívala pozitivní geometrie břitu. V této řadě se využívalo povlakovaných destiček PVD, které byly odolné proti opotřebení a zároveň eliminovali reakce s materiálem obrobku. Díky tomu bylo možné zvyšovat řezné rychlosti, životnost a snížit náklady na díl. [25]



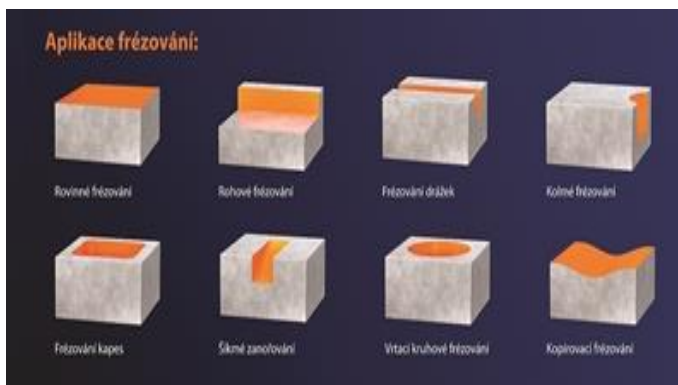
Obrázek 16 Škála výběru destiček [25]

Společnost **Sandvik Coromant** nezhálela, a vyvinula svůj vlastní monolitní nástroj, který nesl název CoroMill Plura HFS. Tento nástroj byl též vyvinut pro obrábění titanových slitin, který byl využíván pro technologii HSM. Největším nepřítelem tohoto nástroje byl difúzní otěr a neekologičností, protože bylo potřeba využívat chladicí kapaliny při obrábění, což vyplývá na obrázku 16. [26]



Obrázek 17 Technologie přívodu kapaliny [26]

Mezi nejnovější řadu nástrojů pro frézování ocelí, nerezů a titanu je řada Garant Power Q od firmy **Hoffmann Group**. Umožňují vysoké posuvy a zároveň velký objem odebíraného materiálu. Pro mě bude nejdůležitější řada Garant Master Titan, které se přímo zaměřuje na titan a jeho slitiny. Na obrázku 18 jsou k nahlédnutí možnosti aplikace těchto nástrojů a na obrázku 19 jsou ukázány samotné frézy. [27]



Obrázek 18 Aplikace frézování [27]



Obrázek 19 Frézy Garant Master Titan [27]

6.3 Nejčastější povlaky při frézování titanu

TiN je nejčastějším povlakem pro všeobecné využití kvůli své poměrně vysoké tepelné stabilitě a jeho chemická inertnosti. Má velmi nízkou reaktivitu vůči oceli. Z toho důvodu je velmi omezeno opotřebení, které vzniká přilnavostí. Z toho důvodu se tento povlak využívá pro obrábění slitin železa a oceli, pro odvalování, tváření a tvorbu závitů. [28]

TiCN jedná se o povlak s komplexní vícevrstvou strukturou, která se vyrábí obloukovou technologií. I když má povlak vysokou tvrdost, není zde viditelná kompenzace na křehkosti povlaku. Při obrábění se využívají tyto povlaky při maximálních teplotách 400 °C, které vznikají v průběhu obrábění, které se dá vyřešit pomocí chlazení a v porovnání s předchozím povlakem je tento povlak výhodnější z hlediska vyšší tvrdosti. [29]

TiAlN se řadí mezi nejčastěji používaný povlak při využití technologie suchého obrábění. Tento povlak má výbornou odolnost vůči vysokým teplotám a díky oxidu hliníku se jedná o velmi houževnatý povlak. Využívá se v oblastech, kde se vyskytuje rovnoměrné abrazivní opotřebení povrchu. [30]

AlTiN Jedná se o obdobný povlak jako předchozí TiAlN s rozdílem, že u povlaku AlTiN se vyskytuje jiné rozložení prvků v povlaku a vyšší tvrdostí. Tento povlak je vhodný pro suché obrábění těžkoobrobitelných materiálů. [31]

Tabulka 4 Shrnutí vlastností nejpoužívanějších povlaků [28, 29, 30, 31]

Povlak	Barva	Tvrdost (HV)	Teplota použití do (°C)	Tloušťka (μm)	Použití
TiN	zlatá	2300 ± 200	500	1-4	Univerzální použití.
TiCN	Modrá, šedá	3500 ± 500	400	1-4	Přerušovaný řez při například frézování.
TiAlN	fialový bronz	2800 ± 300	700	5-10	stabilní řezy
AlTiN	černý	3300 ± 300	800	2-5	Těžkoobrobitelné materiály

7 Experiment

V této části se budu věnovat zkoumání povrchové integrity obrobeného polotovaru, silách naměřených při obrábění, které budou hodnoceny z pohledu 3 řezných rychlostí, 3 posuvů při využití 5 destiček o různém úhlu čela což nám dává 45 měření ke zhodnocení.

7.1 Postup při experimentu

1. Výběr stroje, na kterém se experimenty budou provádět
2. Výběr VBD pro provedení daného experimentu
3. Výběr nástrojů, do kterého se upne daná VBD
4. Výroba drážek na bocích polotovaru pro lepší manipulaci a upnutí
5. Upnutí obrobku na dynamometr, Instalace dynamometru do stroje a následná Kalibrace stroje, dynamometru a obrobku
6. Vytvoření G kódu pro obrobení
7. Obrobení tvaru pro měření
8. Obrábění úseků a měření sil
9. Měření drsnosti
10. Zhodnocení opotřebení destičky
11. Vyhodnocení

7.2 Stroj

VMC 500 je tříosé obráběcí centrum, které pracuje se softwarem Acramatic A2100. Na tomto stroji bude prováděn experiment, u kterého budu využívat technologii rovinného frézování, což je pro tento stroj vhodné kvůli svým parametrům viz Tabulka 5 technických parametrů.



Obrázek 20 Obráběcí centrum VMC 500

Tabulka 5 Technické parametry VMC 500 [34]

Technické parametry stroje		
Upínací rozměry stolu	Délka stolu	787,4 mm
	Šířka stolu	508,0 mm
	Osa X	508,0 mm
	Osa Y	508,0 mm
	Osa Z	508,0 mm
Upínací kužel vřetena		CAT 40 (ISO 40)
Maximální otáčky vřetene		8000 min^{-1}
Výkon vřetene		11,2 kW

7.3 Výběr VBD pro provedení daného experimentu

Pro tento experiment jsem vybral kruhové VBD. Ze 17 možných destiček, které se lišily především utvařečem třísky, povlakováním a úhly čela, kde se jedna destička musela dobrousit, aby vznikl nulový úhel čela. Pro své experimentální měření jsem vybral 5 destiček, které se lišily především úhlem čela, který budu zkoumán v závislosti na síle a opotřebení. Liší se taktéž utvařečem třísky což je znázorněno v tabulce 6., který zlepšuje zpracování třísky, což navyšuje trvanlivost nástroje a z čehož vyplývá možnost nastavovat vyšší řezné podmínky.


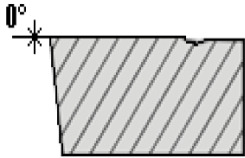


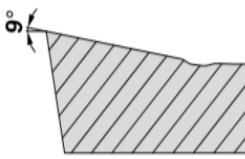


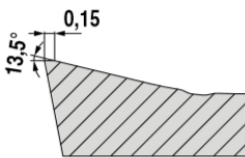


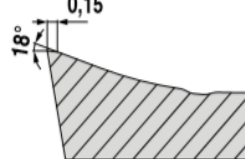


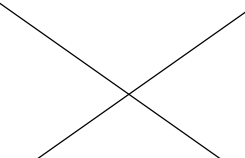

Tabulka 6 Vybrané kruhové destičky

Č.	označení destičky	Výrobce	Úhel čela	utvařeč	Fazeta	Povlaky	Zaoblení (E) - Zkosená a zaoblená (S)
1	RPHX 1204MOEN _0	CERATIZIT (UPRAVENO)	0	Broušené			
2	RPHX 1204MOEN	CERATIZIT	9	M30	0,15	PVD	E
3	RPHX 1204MOSN	CERATIZIT	13.5	M50	0,15	PVD	S
4	RPHX 1204M4SN	CERATIZIT	18	F50	0,15	PVD	S
5	RCKT 1204MO – PM S40T	SANDVIK	20.9	S40T	0,12	CVD	S

Vybrané destičky byly především od firmy Ceratizit, díky čemuž jsme získali stejné podmínky na obrábění pro první 4 úhly čela, kdežto u konkurenční firmy Sandvik bylo nutné změnit nástroj, s čím přišlo i na změnu řezných podmínek z důvodů zvětšení nástroje viz téma Nástroje.

Z pohledů úprav utvařeče destiček je zřejmé, že u broušené destičky není žádná úprava čela. U destičky s úhlem čela $\gamma_o = 9^\circ$ a utvařečem třísky M30 je destička na špičce zaoblená. Destička s úhlem čela $\gamma_o = 13,5^\circ$ a utvařečem třísky M50 je zaoblená na špičce s přidanou fazetou 0,15 mm stejně jako u destičky s úhlem čela $\gamma_o = 18^\circ$ a utvařečem třísky F50, a to vše je k náhledu v tabulce 7. Fazeta dopomáhá při obrábění a tím snižuje silové účinky v průběhu obrábění. V případě úhlu čela $\gamma_o = 20,9^\circ$ je utvařeč třísky S40T podle výrobce unikátní ve své dlouhé životnosti oproti klasickým kruhovým destičkám. [35, 36]

Tabulka 7 Vizualní znázornění destiček

Označení destičky	Zobrazení destičky	Úprava	Upnutí
RPHX 1204MOEN_0			
RPHX 1204MOEN			
RPHX 1204MOSN			
RPHX 1204M4SN			
RCKT 1204MO – PM			

7.4 Nástroj

Po vybrání VBD bylo zapotřebí zvolit nástroje, pro jejich upnutí. Pro upnutí destiček s úhlem čela $\gamma_o = (9; 13,5; 18)^\circ$ a nakonec destičkou, která byla nabroušena na $\gamma_o = 0^\circ$ byl vybrán nástroj nástrčná fréza A251.63.R.06-12-RS obrázek 21. od firmy WT, který má průměr $D=63$ mm. Na upnutí destičky s úhlem čela $\gamma_o = 20,9^\circ$ bylo zapotřebí využít nástroj R200-088Q32-12M obrázek 22. o průměru $D=100$ mm od firmy Sandvik, u které oproti nástroji od firmy WT jsou jinak vyloženy destičky, díky čemuž bylo potřeba brát v potaz natočení plochy, na které je upnuta destička. Výrobce uvádí, že natočení plochy je 7° z čehož vyplývá, že se během experimentu bude tato destička chovat jako kdyby její úhel čela byl $\gamma_o = 13,9^\circ$. A proto ji budu uvádět jako destičku s úhlem čela $\gamma_o = 13,9^\circ$.



Obrázek 21 WT pro – A251.63.R.06-12-RS

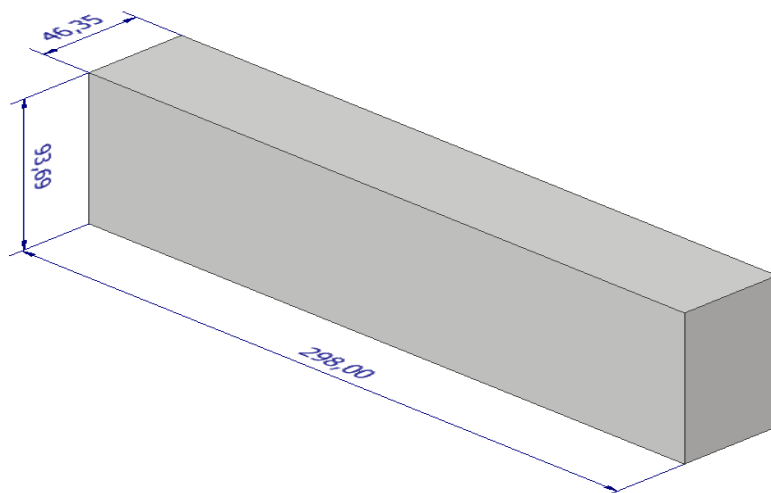


Obrázek 22 Sandvik – R200-088Q32-12M



Obrázek 23 Nástrčné frézy v držácích

7.5 Polotovár



Obrázek 24 3D model polotovaru



Obrázek 25 Polotovár

Pro tento polotovár bude využita technologie rovinného frézování, což nám umožnilo upnutí polotovaru za čelo, proto bylo zapotřebí vymyslet jinou technologii upnutí.



Obrázek 26 Fréza JHP780100E2R080.0Z4-M64

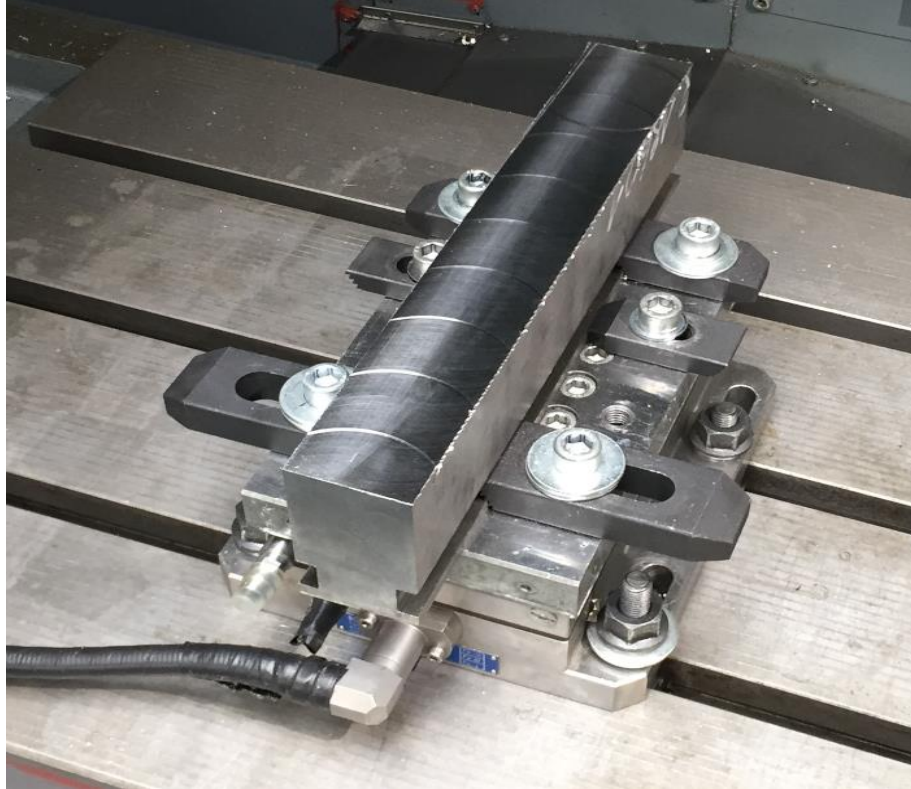


Obrázek 27 Vyfrézované drážky

Pro vhodné uchycení polotovaru na dynamometr byly vyfrézovány dvě drážky po celé délce polotovaru, široké $b_d=10$ mm do hloubky $h_d=5$ mm pomocí válcové frézy JHP780100E2R080.0Z4-M64 o průměru $D=10$ mm. Následně byl polotovár upnut na dynamometr pomocí prizmatických upínek, šroubů a podložek.

7.6 Instalace dynamometru do stroje

Po vytvoření drážek bylo zapotřebí do stroje nainstalovat dynamometr, upnout na něm polotovar, nakonfigurovat dynamometr a následně na stroji vyrovnat polotovar a dynamometr pomocí úchylkoměru k zajištění rovinnosti s vedením stroje, a tak i k přesnějšímu obrábění potažmo měření.



Obrázek 28 Nastavený obrobek

Po upnutí obrobku a kalibraci stroje a dynamometru bylo zapotřebí definovat nulový bod pro obrobek. To se provedlo pomocí obrobkové sondy, kdy se najede k hraně obrobku a postupně se přijíždí k obrobku. Jakmile se sonda dotkne obrobku oznámí nám to (Buď celou dobu svítí a při doteku přestane anebo naopak). V tomto případě je možné nastavit nulový bod v jedné z os (Je nutné uvažovat s poloměrem sondy) a tímto postupem pokračovat k nastavení nulového bodu ve všech osách.

7.7 Vytvoření G-M kódu

G kód taktéž známý jako ISO kód je programovací jazyk obráběcího stroje, pomocí kterého instruuje stroj nebo nástroj k pohybu pro vykonání operace.

Mezi nejčastější G kódy patří:

- G00 – rychlé polohování (Rychloposuv)
- G01 – lineární pohyb
- G02 – Pohyb kruhový ve směru hodinových ručiček
- G03 – Pohyb kruhový proti směru hodinových ručiček

M kód je programovací jazyk pro obráběcí stroje, který nám zajišťuje spuštění strojových funkcí

Mezi nejčastější M kódy patří:

- M02 – Zastavení programu
- M03 – Spuštění pravých otáček vřetene
- M05 – Zastavení otáček vřetene
- M06 – Automatická výměna nástroje

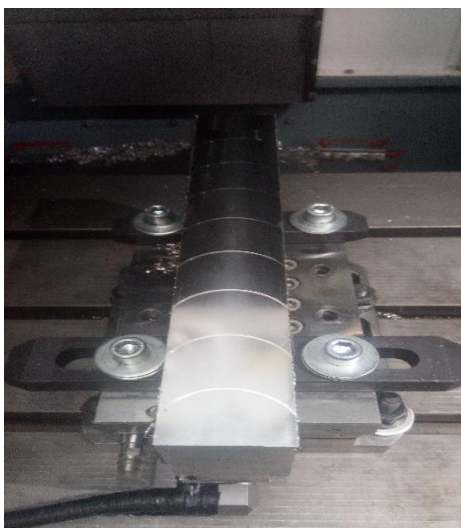
Kód využitý pro obrábění	popis
;	
M06 T5	V této části byl zvolen definovaný nástroj, nastaveny otáčky a přejetí frézy před obrobek do hladiny vhodné pro obrobek 1 mm
M03 S347	
G00 x0 y-35	
G00 z-1	
G01 y3 f17	Nyní se jedná o obrábění prvního úseku po obrobek úseku se nástroj posune výše a vrátí o 5 mm zpátky kvůli hladkému náběhu
G01 z-0,9	
G00 y-2	
G01 y36 f28	Dále se pokračovalo obráběním zbylých dvou úseků při parametrech řezná rychlost: $V_c = 60m/min$ posuv na zub: $f_z = 0,08mm$ $f_z = 0,12mm$
G01 z-0,8	
G00 y31	
G01 y69 f42	
G01 z-0,7	
G00 y64	

Kód využitý pro obrábění			popis
M3		S868	
G01	y102	f43	V tomto kroku se nastavily vyšší otáčky, čím jsem dosáhl řezné rychlosti $V_c = 150 \text{ m/min}$ posuv na zub: $f_z = 0,05 \text{ mm}$ $f_z = 0,08 \text{ mm}$ $f_z = 0,12 \text{ mm}$
G01	z-0,6		
G00	y97		
G01	y135	f69	
G01	z-0,5		
G00	y130		
G01	y168	f104	
G01	z-0,4		
G00	y163		
M3		S1273	
G01	y201	f64	V posledním kroku jsem nastavil nejvyšší otáčky, čím jsem dosáhl řezné rychlosti: $V_c = 220 \text{ m/min}$ posuv na zub: $f_z = 0,05 \text{ mm}$ $f_z = 0,08 \text{ mm}$ $f_z = 0,12 \text{ mm}$ A nakonec jsem se dostal na bezpečnou vzdálenost, kde jsem přešel zpět před obrobek pro možnost dalšího obrábění.
G01	z-0,3		
G00	y196		
G01	y234	f102	
G01	z-0,2		
G00	y229		
G01	y295	f153	
G01	z-0,1		
G00	z5		
G00	y-35		

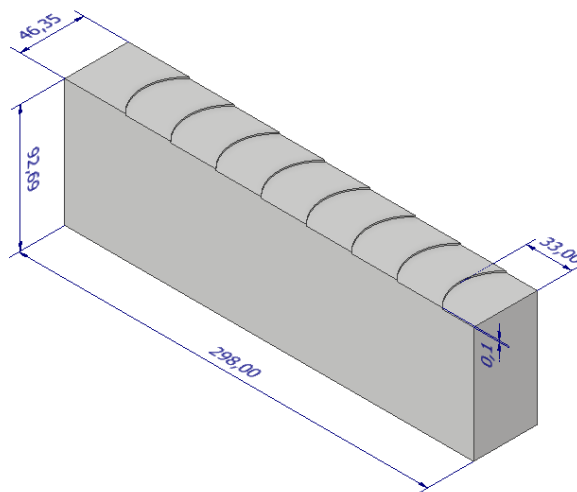
Tento kód byl využit pro obrábění pomocí destiček s úhlem čela $\gamma_o = (0, 9, 13,5 \text{ a } 18)^\circ$ díky možnosti stejné technologie upnutí destičky do nástroje. Pro poslední destičku s úhlem čela $\gamma_o = 13,9^\circ$ bylo zapotřebí přepočítat otáčky a posuvy, kvůli větším rozměrům nástroje k čemuž se přidal i posun nulového bodu ve směru osy Y.

7.8 Obrobení tvaru pro měření

Po vytvoření kódu pro vyhodnocování experimentu jsem vytvořil nový kód, který měl za cíl vyhodnotit správnost předešlého kódu a zároveň pro vytvoření geometrie pro následné frézování pomocí rovinné nástrčné frézy A251.63.R.06-12-RS s destičkou s úhlem čela $\gamma_0 = 9^\circ$ při použití minutového posuvu $f_{min} = 70 \text{ mm/min}$ a otáček $n=573 \text{ ot/min}$. Jednalo se o to, že destička odebrala první úsek, který činil $L_u=33 \text{ mm}$ s hloubkou řezu $a_p = 1 \text{ mm}$, následoval další krok, kdy se nástroj posunul v hladině Z o $0,1 \text{ mm}$, což znamenalo, že hloubka řezu byla $a_p = 0,9 \text{ mm}$, obrobil se druhý úsek o délce $L_u=33 \text{ mm}$ a následně se opakovaly kroky s tím, že se ubrala hloubka řezu o $a_p = 0,1 \text{ mm}$ až k poslednímu úseku, kde hloubka řezu činila $a_p = 0,1 \text{ mm}$. Po dokončení první fáze bylo zapotřebí sjednotit plochy, což znamená, že bylo obrobena všech 9 úseků znovu se stejnou hloubkou třísky a to $a_p = 1 \text{ mm}$, z čehož vznikly plochy, určené pro experimentální měření obrázek 29. na kterých se následně byly vyhodnoceny řezné síly během záběru frézy a následně drsnosti povrchu na obrobených úsecích.



Obrázek 29 První testovací úsek



Obrázek 30 3D Model

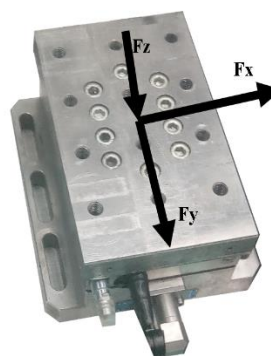
7.9 Měření sil

Pro vyhodnocování silových účinků využívám školní dynamometr soustružnický 9265 obrázek 32, který je připojen přes zesilovač náboje 5019, A/D převodník 5697 až k notebooku, které jsou vidět na obrázku 31. Informace se zpracují v programu DynoWare, který tyto data zpracuje a promítne do grafu pro řeznou sílu ($F_X = F_C$), normálovou sílu ($F_Y = F_{CN}$), a pasivní sílu ($F_Z = F_P$) v závislosti na čase.

Při konfiguraci dynamometru s notebookem bylo zapotřebí po zapojení nastavit několik parametrů. Z počátku byl zapnut převodník, následně zesilovač a nakonec notebook. U zesilovače bylo nutné změnit parametry z IEEE „ON“ na „OFF“ čímž se RS232 změnil z „OFF“ na „ON“. Následně se změnila hodnota konstanty BR z 2400 na 1200.



Obrázek 31 Notebook se zesilovačem náboje v provozu



Fx... Řezná síla (N)
Fy... Normálová síla (N)
Fz... Pasivní síla (N)

Obrázek 32 Rozložení sil na dynamometru

Jako jedna z posledních věcí, co bylo potřeba udělat pro měření bylo spustit program DynoWare a následné nastavení. Po spuštění programu bylo nutné načíst konfigurační soubor, následně nastavit kanály pro měření, kde se nastavily hodnoty kanálů pro $F_x = -8 \text{ N}$; $F_y = -8 \text{ N}$; $F_z = -3,5 \text{ N}$. Po nastavení už zbývalo poslat tyto parametry na zesilovač pomocí příkazu SEND PARAMETERS, který tyto informace převedl na zesilovač.

Před měřením jsme měli tu možnost upravit si průběh měření, který spočíval ve změně času měření, frekvenci vzorkování, a nakonec adresář pro ukládání souborů.

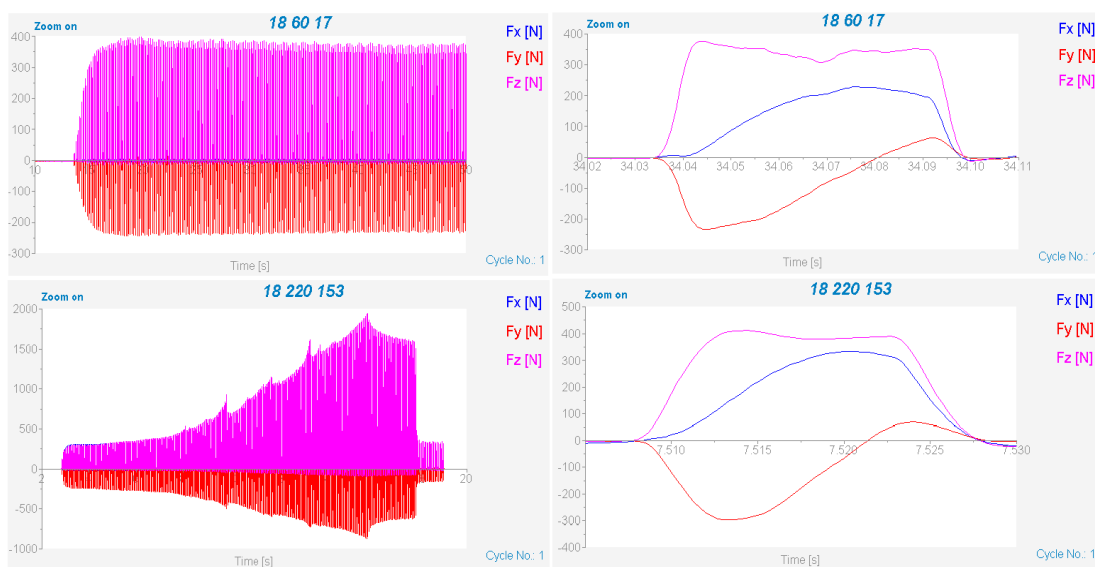
Po nastavení se měření pojmenovalo a popsaly podrobnosti, které popisovaly daný soubor. Po potvrzení stačilo spustit měření.

U prvního měření bylo potřeba ověřit správnost měření dynamometru za pomoci zkušebního tělíska (Siloměr) obrázek 33.



Obrázek 33 Siloměr

Po naměření úseku bylo nezbytné vyhodnotit výsledky. Na obrázku 34. jsem nastínil limitní řezné podmínky pro označení rozdílů. Vybral jsem destičku s úhel čela $\gamma_o = 18^\circ$, protože podle vyhodnocení vycházela jako nejlepší z vybraných z pohledu sil. V horní části je naznačeno vyhodnocení sil, při řezné rychlosti $v_c = 60 \text{ m/min}$ a minutovém posuvu $f_{min} = 17 \text{ mm/min}$, kde lze zpozorovat, že se sily pohybují rozumně, kdežto ve spodní části je znázorněno vyhodnocení při řezné rychlosti $v_c = 220 \text{ m/min}$ a minutovém posuvu $f_{min} = 153 \text{ mm/min}$, kde během delšího záběru frézy, se díky vysokým řezným podmínkám a tím i vyšším tepelným účinkům začaly na sebe navařovat kusy třísky, které se pak namotávaly na nástroj a to způsobilo zkreslení výsledků.



Obrázek 34 Vyhodnocení sil při záběru pro úhel hlavy 18°

7.10 Měření drsnosti

Drsnost frézované plochy byla měřena pomocí mobilního drsnoměru MarSurf PS 10, který je znázorněn na obrázku 35., pomocí kterého jsem odměřil 9 úseků při použití různých řezných podmínek s využitím 5 destiček o různých úhlech čela. U měření je třeba dbát na správné ustavení drsnoměru pro přesné vyhodnocení drsnosti. Při měření drsnosti jsem vyhodnocoval následující parametry:

R_a [μm] – střední aritmetická hodnota drsnosti

R_z [μm] – maximální výška profilu

R_{max} [μm] – Maximální hloubka drsnosti



R_{Sm} [μm] – střední vzdálenost rýh

Během měření jsme zjistili, že střední vzdálenost rýh se dala vyhodnotit pouze u úseků, kde se hodnota střední aritmetické hodnoty drsnosti pohybovala nad $R_a = 0,5 \mu m$, z čehož jsem vyvodil výsledky, že se tento parametr nebude dále vyhodnocovat.



Obrázek 35 Praktické měření plochy

Na obrázku 36. je znázorněn protokol, který byl vygenerován po odměření na ploše u destičky s úhlem čela $\gamma_o = 18^\circ$ s řeznou rychlostí $v_c = 60 \text{ m/min}$ a minutovým posuvem $f_{min} = 17 \text{ mm/min}$.

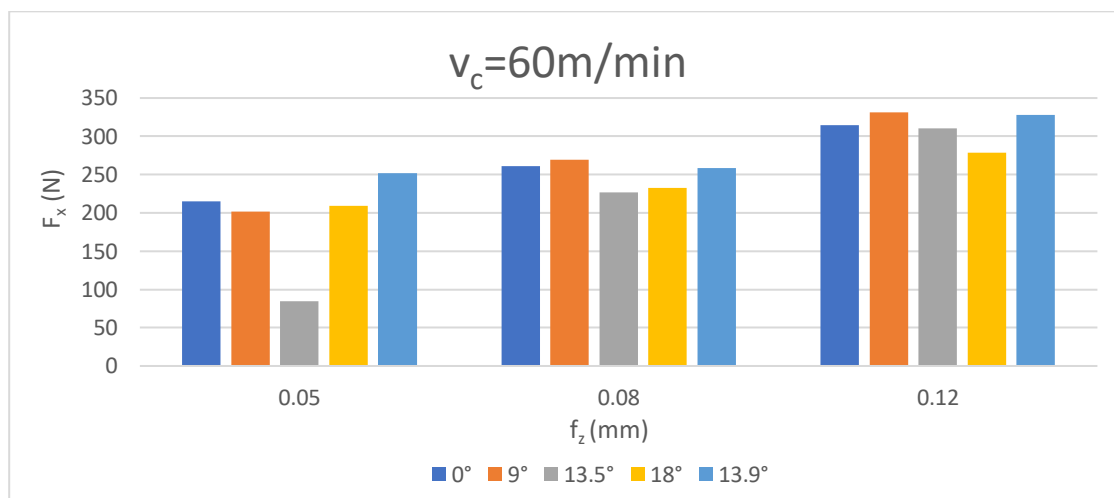
		MarSurf PS 10 1.00-28	
			
R[LC ISO 16610-21 0,25 mm]			
Ra		0,217 μm	
Rz		2,015 μm	
Rmax		3,132 μm	
RSm		-:- μm	

Obrázek 36 Protokol o měření drsnosti

7.11 Vyhodnocení

Na titanovém bloku o celkové délce $L=295$ mm bylo vyfrézováno 9 úseků o výšce 0,1mm. Tato geometrie byla využita pro následné praktické obrábění při parametrech hloubky třísky $a_p=1$ mm, délka obráběného úseku byla $L_u=33$ mm, u kterého bylo zapotřebí navýšit délku úseku o $L_n=5$ mm jako nájezd kvůli správnému záběru nástroje, kdy se měnily parametry jako jsou řezné rychlosti $v_c = (60; 150 \text{ a } 220)$ m/min, posuv na zub $f_z = (0,05; 0,08 \text{ a } 0,12)$ mm a úhlech čela $\gamma_o = (0; 9; 13,5; 18 \text{ a } 13,9)^\circ$. Program byl nastaven tak, aby vždy pracoval s jedním úhlem čela (jednou destičkou), kdy se nastavila řezná rychlost $v_c=60$ m/min a obrábělo se při posuvech $f_z = (0,05; 0,08 \text{ a } 0,12)$ mm, následně se navýšila řezná rychlost na $v_c = 150 \text{ m/min}$ a měnily se opět posuvy na $f_z = (0,05; 0,08 \text{ a } 0,12)$ mm. Nakonec se nastavila maximální zvolená řezná rychlost 220 m/min a obrobily se poslední tři úseky při posuvech $f_z = (0,05; 0,08 \text{ a } 0,12)$ mm.

V první části, kdy řezná rychlost dosahovala $v_c = 60 \text{ m/min}$ a posuv $f_z = (0,05, 0,08 \text{ a } 0,12)$ mm, bylo zřejmé, že řezné síly budou narůstat v závislosti na posuvu především kvůli vyšší vytiženosti destičky při nižších řezných rychlostech.

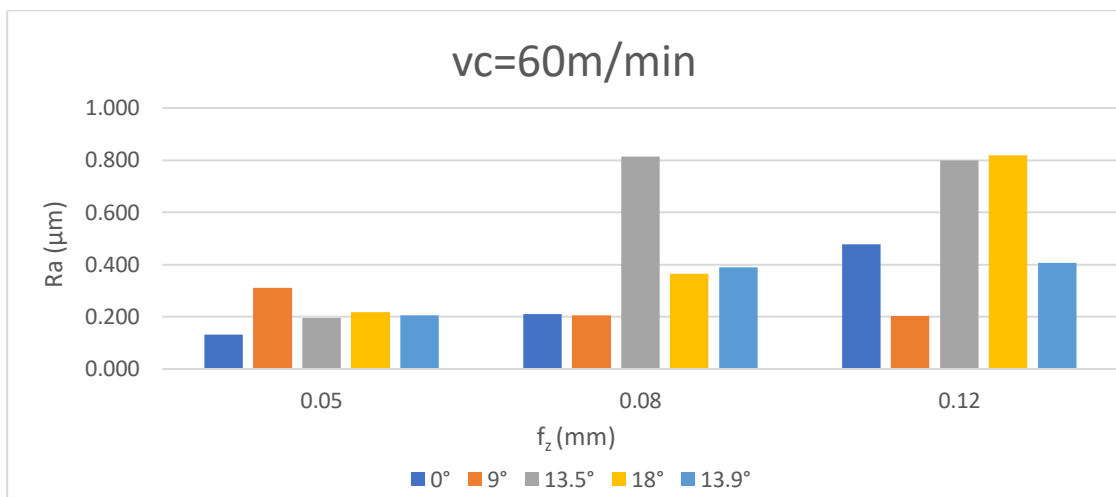


Graf 1 Závislost řezné síly na posuvu na zub při řezné rychlosti 60 m/min

Z grafu závislosti řezné síly na posuvu lze zpozorovat, že při těchto podmínkách byla neoptimálnější destička s úhlem čela $\gamma_o = 18^\circ$. V tomto případě optimální z důvodu nízké silové zátěže a zároveň kvůli nízkému nárůstu sil, který činí $F_x=70$ N. Jako nejhůře vyhodnocená byla destička s úhlem čela $\gamma_o = 9^\circ$, kde počáteční síla je nízká, kdežto nárůst síly dosahoval $F_x=130$ N, což může být způsobeno absencí fazety oproti zbylým

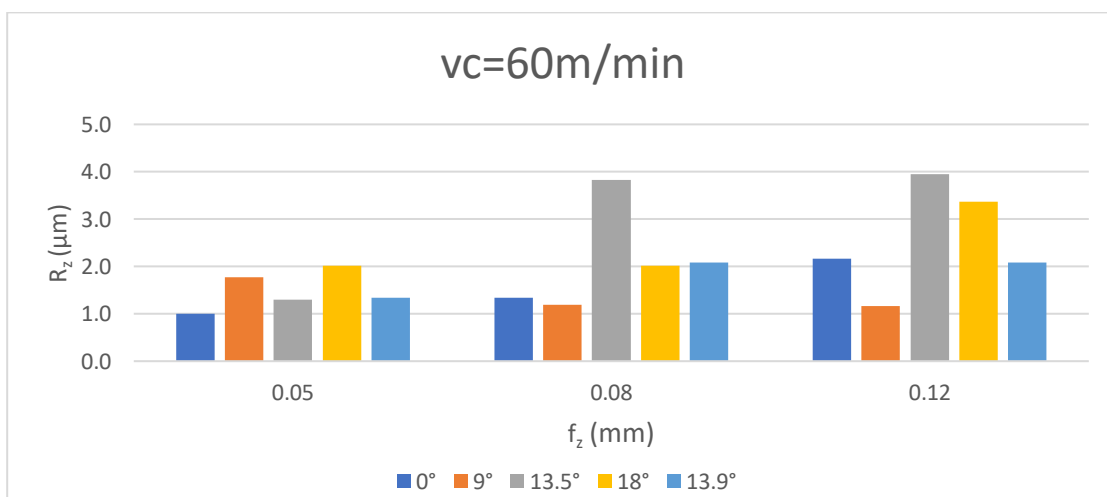
destičkám. Při využití destičky s úhlem čela $\gamma_o = 13,5^\circ$ došlo pravděpodobně k podebrání materiálu destičkou, což způsobilo, že naměřená síly je vychýlena od ostatních.

Při zkoumání závislosti drsnosti R_a na posuvu na zub jsem vyhodnotil, že destička s úhlem čela $\gamma_o = 9^\circ$ vyšla velice příznivě při srovnání limitních hodnotách posuvu a to $R_a=0,106 \mu\text{m}$, kdežto u destičky s úhlem čela $\gamma_o = 18^\circ$ došlo k výraznému zhoršení drsnosti, a to k rozdílu $R_a=0,602 \mu\text{m}$.



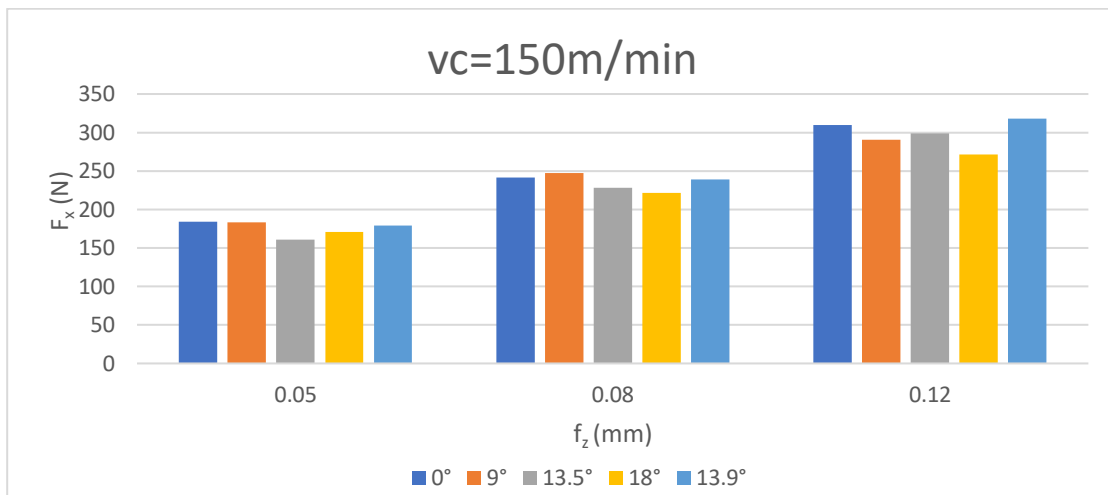
Graf 2 závislost R_a na posuvu na zub při řezné rychlosti 60 m/min

Z pohledu maximální výšky profilu byla nejlépe vyhodnocená destička s úhlem $\gamma_o = 9^\circ$, kdy hodnota limitních rozdílů dosahovala $R_z=0,608 \mu\text{m}$ a nejhůře dopadla destička s úhlem čela $\gamma_o = 13,5^\circ$, kde se rozdíl hodnot projevil jako $R_z=2,653 \mu\text{m}$.



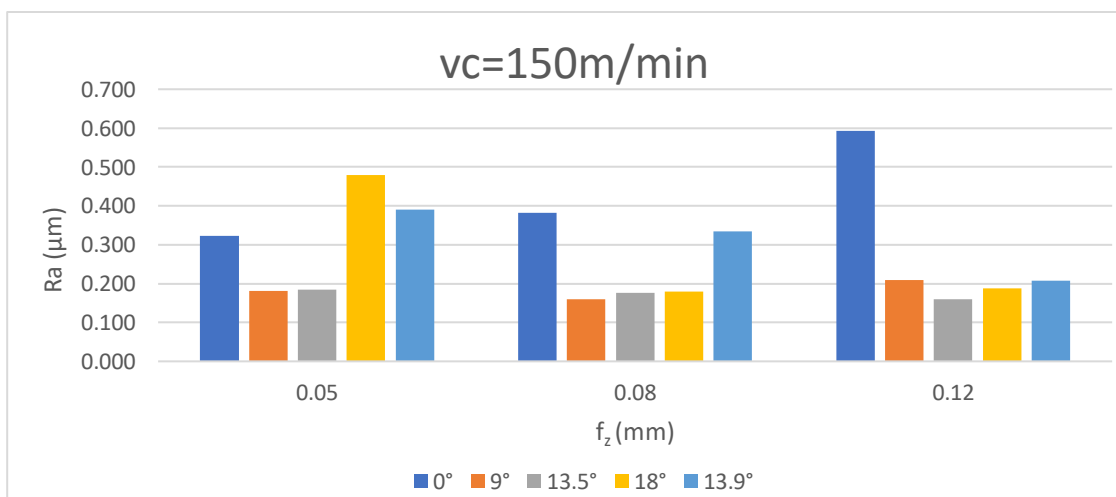
Graf 3 závislost R_z na posuvu na zub při řezné rychlosti 60 m/min

V druhé části se využila řezná rychlost $v_c=150$ m/min při využitých posuvech $f_z=(0,05; 0,08$ a $0,12)$ mm. Z grafu závislosti řezné síly na posuvu je zřejmé, že nejmenší nárůst $F_x=100$ N se dá sponzorovat při využití destičky s úhlem natočení $\gamma_o =18^\circ$ kdežto k nejvyššímu nárůstu řezné síly která činila $F_x=139$ N došlo při využití destičky s úhlem natočení $\gamma_o =13,9^\circ$.



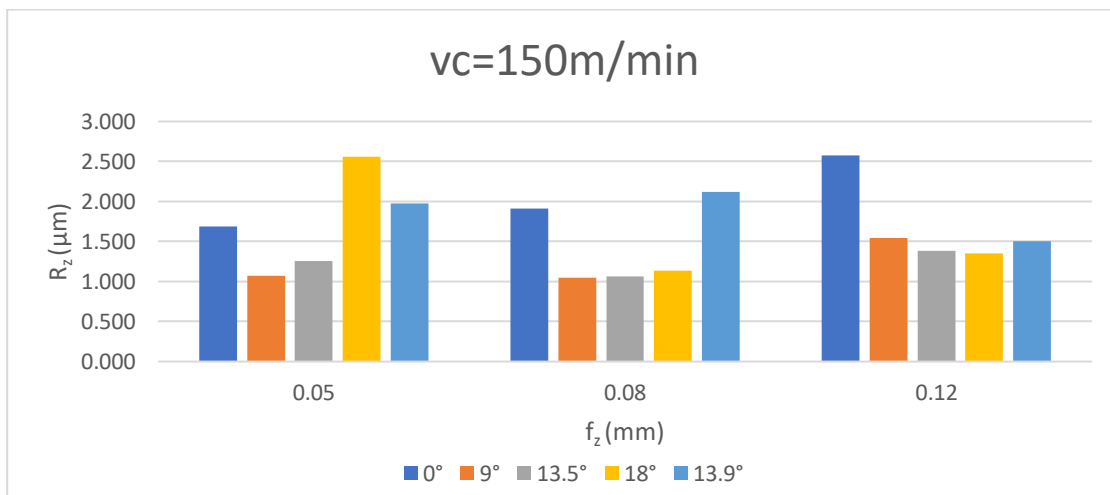
Graf 4 závislost řezné síly na posuvu na zub při řezné rychlosti 150 m/min

Z pohledu střední aritmetická hodnota drsnosti vyšla nejlépe destička s úhlem čela $\gamma_o =13,5^\circ$ u které je rozdíl mezi limitními hodnotami $Ra=0,024$ μm a nejhůře destička s úhlem čela $\gamma_o =18^\circ$, kde hodnota rozdílu u limitních podmínek se rovnala $Ra=0,291$ μm .



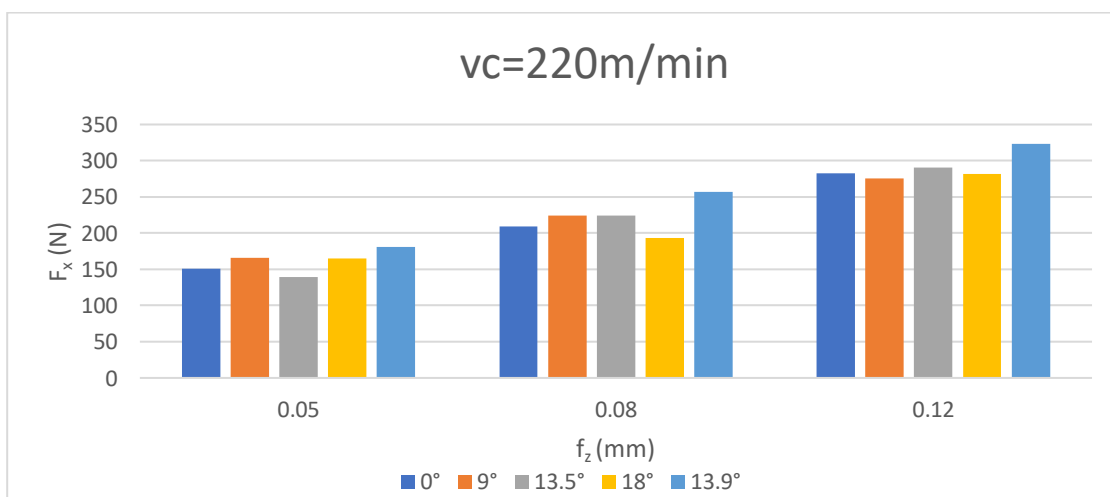
Graf 5 závislost drsnosti Ra na posuvu na zub při řezné rychlosti 150 m/min

Z hlediska maximální výšky profilu je zřetelné, že se tyto hodnoty pohybují obdobně z pohledu proporcí grafu, kde byla nejlépe vyhodnocená destička s úhlu $\gamma_o = 13,5^\circ$ a hodnota $R_z=0,131 \mu\text{m}$ a nejhorší hodnota byla u destičky s úhlem čela $\gamma_o = 18^\circ$, kde se pohybovala hodnota $R_z=1,208 \mu\text{m}$.



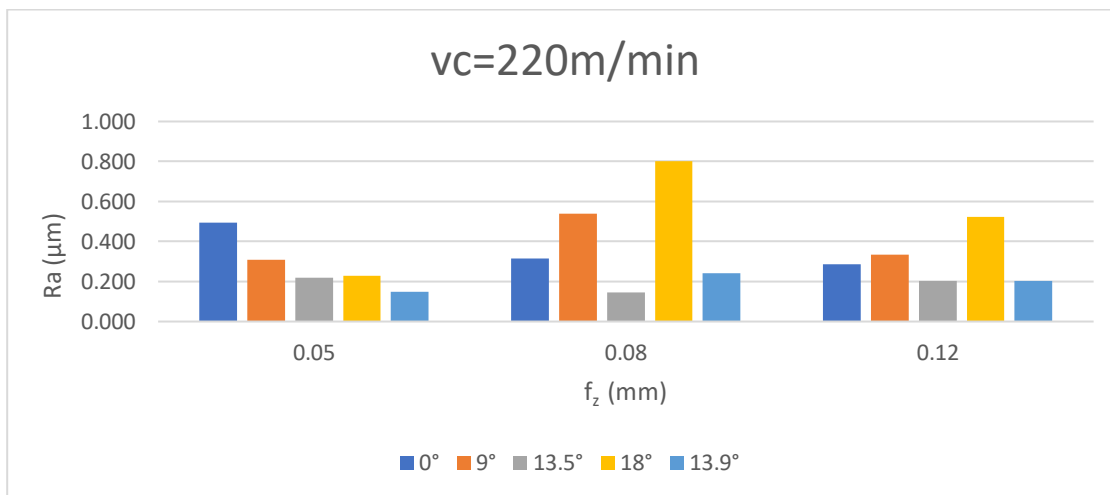
Graf 6 závislost drsnosti R_z na posuvu na zub při řezné rychlosti 150 m/min

Ve třetí části se využila řezná rychlost $v_c=220 \text{ m/min}$ při využitých posuvech $f_z=(0,05; 0,08 \text{ a } 0,12) \text{ mm}$. Z grafu závislosti řezné síly na posuvu je patrné, že nejmenší nárůst $F_x=110 \text{ N}$ se dá sponzorovat při využití destičky s úhlem natočení $\gamma_o = 9^\circ$ kdežto k nejvyššímu nárůstu řezné síly která činila $F_x=151 \text{ N}$ došlo při využití destičky s úhlem natočení $\gamma_o = 13,5^\circ$.



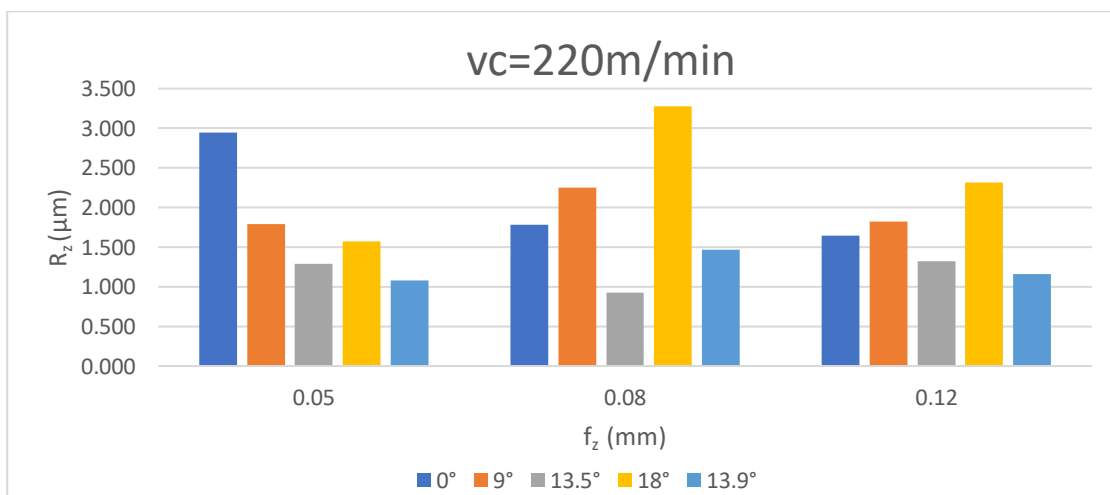
Graf 7 závislost řezné síly na posuvu na zub při řezné rychlosti 220 m/min

Z pohledu střední aritmetická hodnota drsnosti vyšla nejlépe destička s úhlem čela $\gamma_o = 13,5^\circ$ u které je rozdíl mezi limitními hodnotami $R_a=0,015 \mu\text{m}$ a nejhůře destička s úhlem čela $\gamma_o = 18^\circ$, kde hodnota rozdílu u limitních podmínek se rovnala $R_a=0,294 \mu\text{m}$.



Graf 8 závislost drsnosti R_a na posuvu na zub při řezné rychlosti 220 m/min

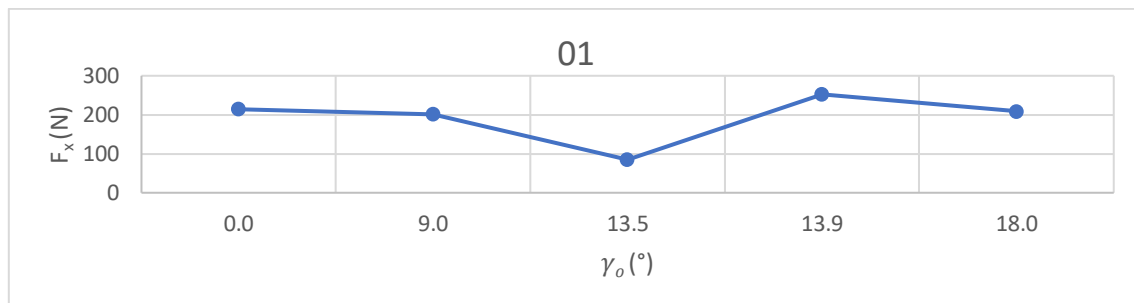
Z hlediska maximální výšky profilu je zřejmé, že se tyto hodnoty pohybují obdobně z pohledu proporcí grafu, kde byla nejlépe vyhodnocená destička s úhlu $\gamma_o = 9^\circ$ a hodnota $R_z=0,031 \mu\text{m}$ a nejhorší hodnota byla u destičky s úhlem čela $\gamma_o = 0^\circ$, kde se pohybovala hodnota $R_z=1,304 \mu\text{m}$.



Graf 9 závislost drsnosti R_z na posuvu na zub při řezné rychlosti 220 m/min

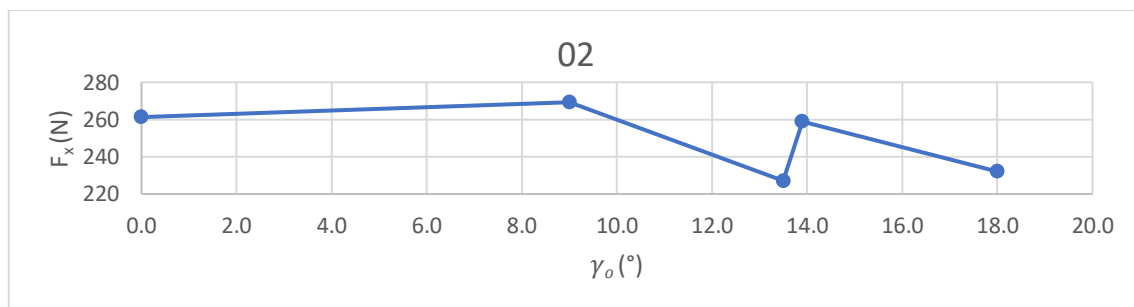
7.12 Porovnání sil

Při porovnání sil lze z grafu vyčíst, že v prvním úseku, kde se řezná rychlost pohybovala $v_c=60$ m/min a posuvu na zub $f_z=0,05$ mm by bylo vhodné využít destičku s úhlem čela $\gamma_o = 0^\circ$ a $\gamma_o = 18^\circ$ naopak nevhodné by bylo využití destičky s úhlem $13,9^\circ$.



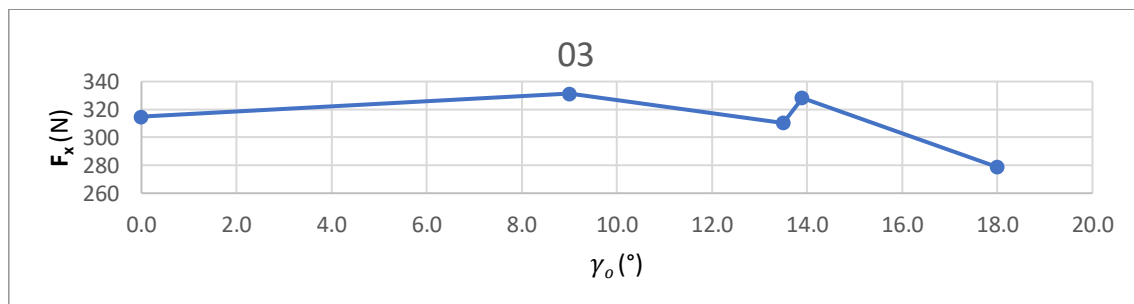
Graf 10 Závislost řezné síly na úhlu čela při prvním úseku

Ve druhém úseku, kde se řezná rychlost pohybovala $v_c=60$ m/min a posuvu na zub $f_z=0,08$ mm by bylo vhodné využít destičku s úhlem čela $\gamma_o = 13,5^\circ$ a $\gamma_o = 18^\circ$ naopak nevhodné by bylo využití destičky s úhlem 9° .



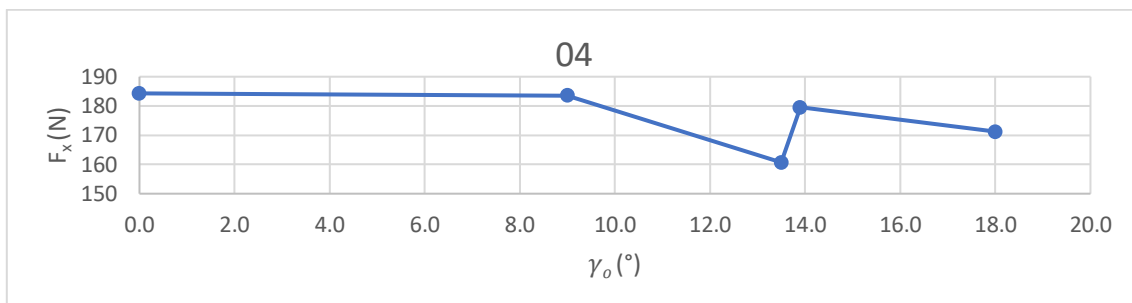
Graf 11 Závislost řezné síly na úhlu čela při druhém úseku

Ve třetím úseku, kde se řezná rychlost pohybovala $v_c=60$ m/min a posuvu na zub $f_z=0,12$ mm by bylo vhodné využít destičku s úhlem čela $\gamma_o = 13,5^\circ$ a $\gamma_o = 18^\circ$ naopak nevhodné by bylo využití destičky s úhlem 9° .



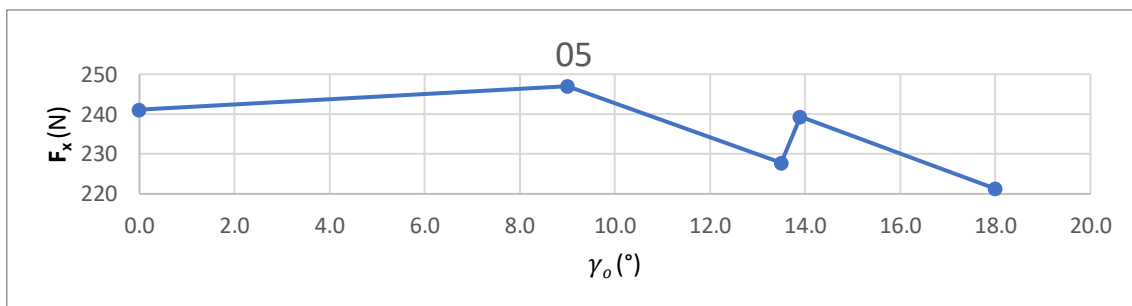
Graf 12 Závislost řezné síly na úhlu čela při třetím úseku

Ve čtvrtém úseku, kde se řezná rychlost pohybovala $v_c=150$ m/min a posuvu na zub $f_z=0,05$ mm by bylo vhodné využít destičku s úhlem čela $\gamma_o = 13,5^\circ$ a $\gamma_o = 18^\circ$ naopak nevhodné by bylo využití destičky s úhlem 9° .



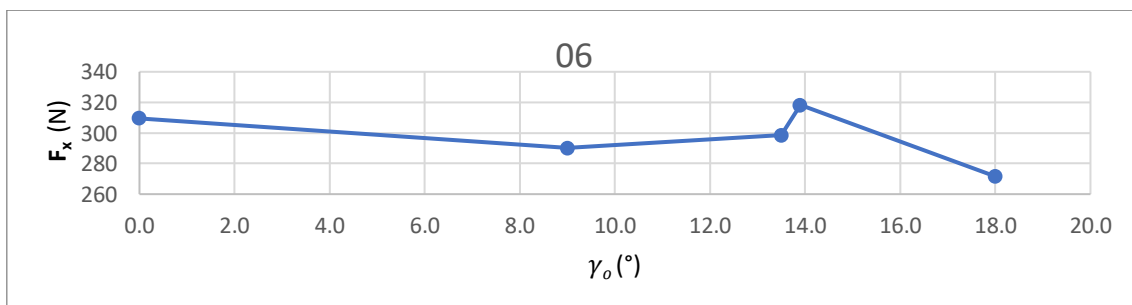
Graf 13 Závislost řezné síly na úhlu čela při čtvrtém úseku

V pátém úseku, kde se řezná rychlost pohybovala $v_c=150$ m/min a posuvu na zub $f_z=0,08$ mm by bylo vhodné využít destičku s úhlem čela $\gamma_o = 13,5^\circ$ a $\gamma_o = 18^\circ$ naopak nevhodné by bylo využití destičky s úhlem 9° .



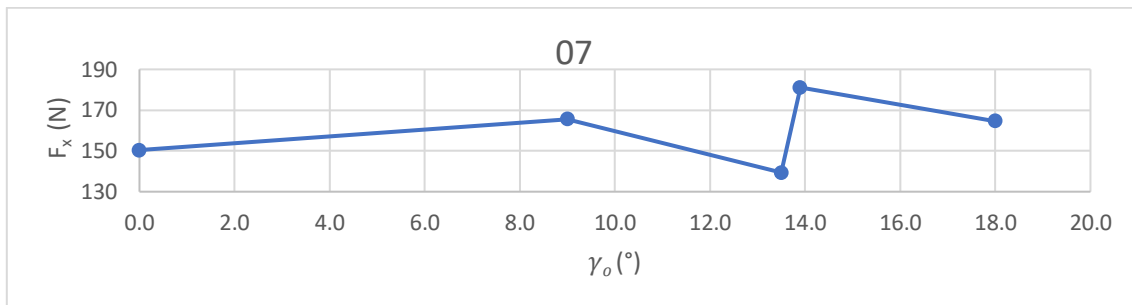
Graf 14 Závislost řezné síly na úhlu čela při pátém úseku

V šestém úseku, kde se řezná rychlost pohybovala $v_c=150$ m/min a posuvu na zub $f_z=0,12$ mm by bylo vhodné využít destičku s úhlem čela $\gamma_o = 9^\circ$ a $\gamma_o = 18^\circ$ naopak nevhodné by bylo využití destičky s úhlem $13,9^\circ$.



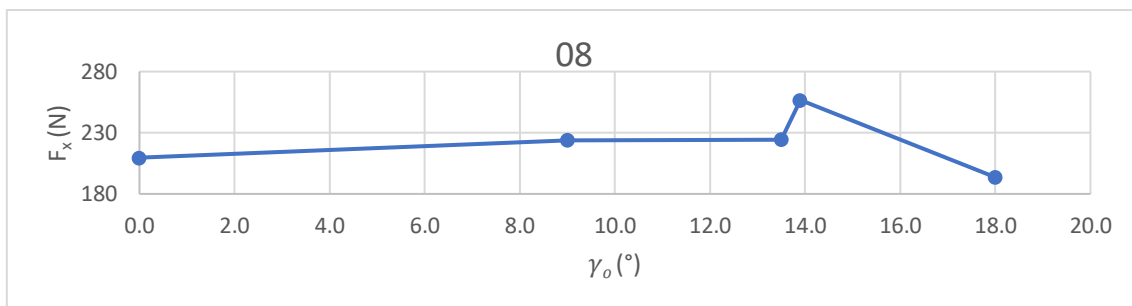
Graf 15 Závislost řezné síly na úhlu čela při šestém úseku

V sedmém úseku, kde se řezná rychlost pohybovala $v_c=220$ m/min a posuvu na zub $f_z=0,05$ mm by bylo vhodné využít destičku s úhlem čela $\gamma_o = 0^\circ$ a $\gamma_o = 13,5^\circ$ naopak nevhodné by bylo využití destičky s úhlem $13,9^\circ$.



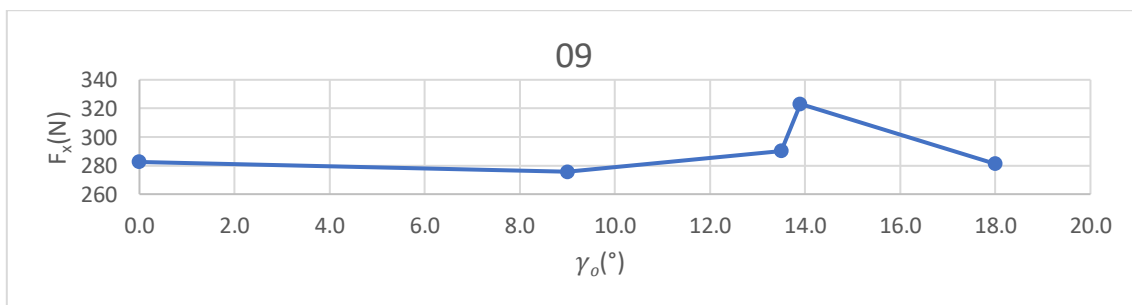
Graf 16 Závislost řezné síly na úhlu čela při sedmém úseku

V osmém úseku, kde se řezná rychlost pohybovala $v_c=220$ m/min a posuvu na zub $f_z=0,08$ mm by bylo vhodné využít destičku s úhlem čela $\gamma_o = 0^\circ$ a $\gamma_o = 18^\circ$ naopak nevhodné by bylo využití destičky s úhlem $13,9^\circ$.



Graf 17 Závislost řezné síly na úhlu čela při osmém úseku

V devátém úseku, kde se řezná rychlost pohybovala $v_c=220$ m/min a posuvu na zub $f_z=0,12$ mm by bylo vhodné využít destičku s úhlem čela $\gamma_o = 9^\circ$ a $\gamma_o = 18^\circ$ naopak nevhodné by bylo využití destičky s úhlem $13,9^\circ$.

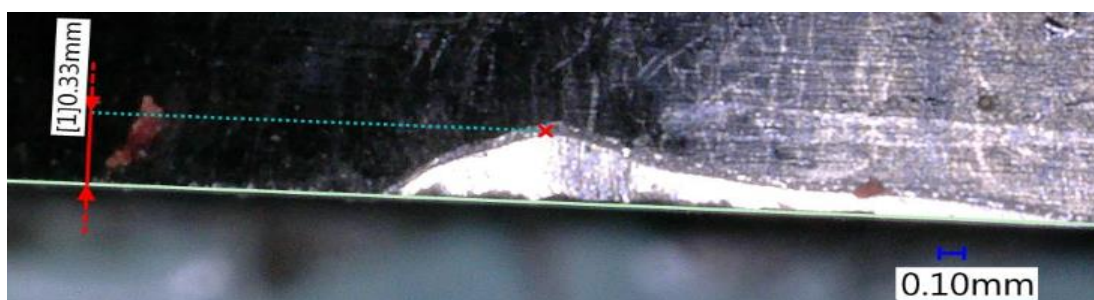


Graf 18 Závislost řezné síly na úhlu čela při devátém úseku

7.13 Opotřebení

Opotřebení na destičkách bylo vyhodnocováno při nejvyšších řezné rychlosti $v_c=220$ m/min, aby bylo zřejmé, jak se deformace projevuje maximálních podmínkách experimentu.

U destičky RPHX 1204MOEN_0 s úhlem čela $\gamma_o=0^\circ$ a posuvu na zub $f_z=0,05$ mm bylo vyhodnoceno pomocí digitálního mikroskopu, že opotřebení destičky bylo $VB=0,33$ mm což je znázorněno na obrázku 37.



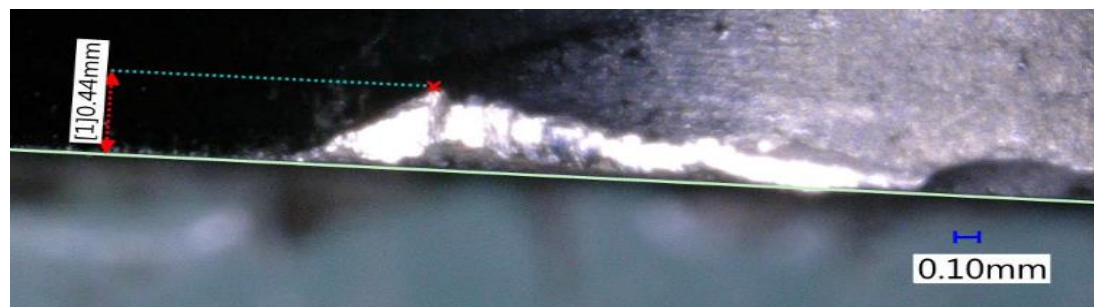
Obrázek 37 opotřebení destičky při posuvu 0,05mm s úhlem čela 0°

Při posuvu na zub $f_z=0,08$ mm bylo vyhodnoceno pomocí digitálního mikroskopu, že opotřebení destičky bylo $VB=0,40$ mm což je vyhodnoceno na obrázku 38.



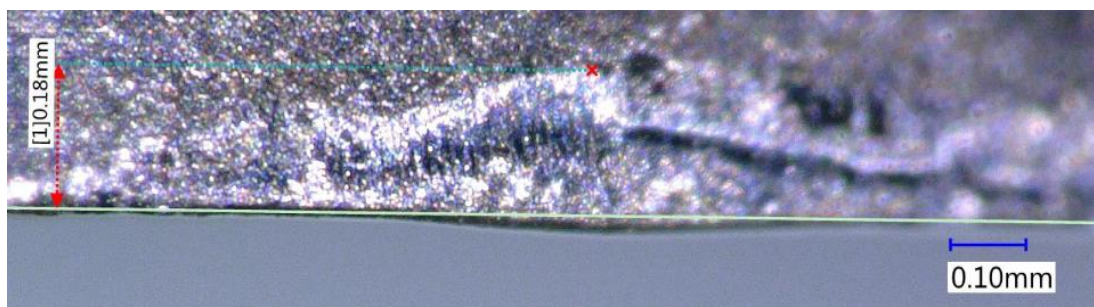
Obrázek 38 opotřebení destičky při posuvu 0,08mm s úhlem čela 0°

Při posuvu na zub $f_z=0,12$ mm bylo vyhodnoceno pomocí digitálního mikroskopu, že opotřebení destičky bylo $VB=0,44$ mm což je vidět na obrázku 39.



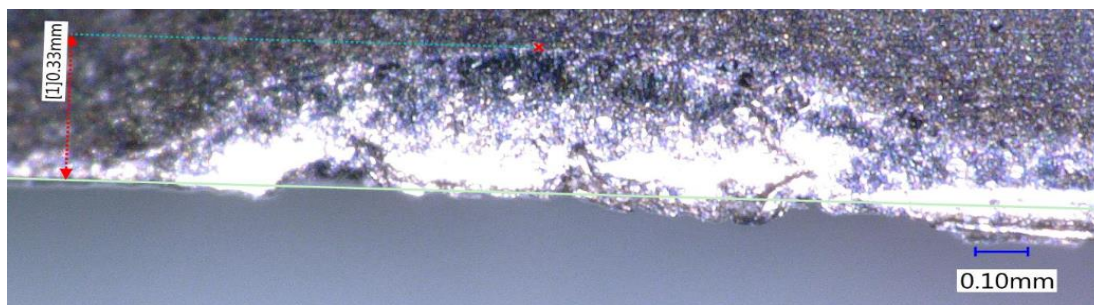
Obrázek 39 opotřebení destičky při posuvu 0,12mm s úhlem čela 0°

U destičky RPHX 1204MOEN s úhlem čela $\gamma_o = 9^\circ$ a posuvu na zub $f_z = 0,05$ mm bylo vyhodnoceno pomocí digitálního mikroskopu, že opotřebení destičky bylo $VB = 0,18$ mm což je zobrazeno na obrázku 40.



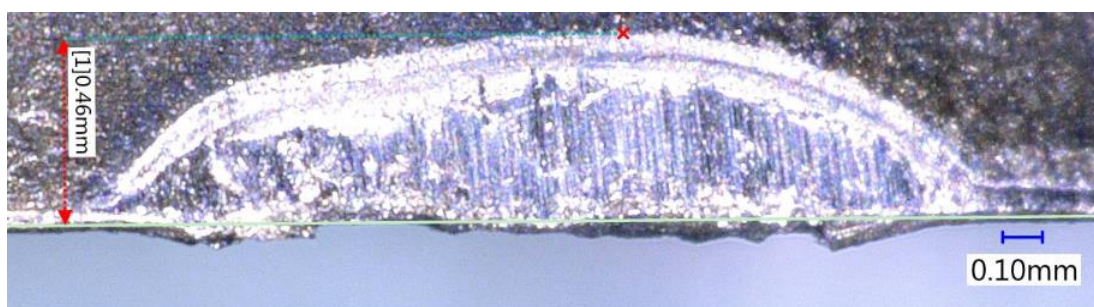
Obrázek 40 opotřebení destičky při posuvu 0,05mm s úhlem čela 9°

Při posuvu na zub $f_z = 0,08$ mm bylo vyhodnoceno pomocí digitálního mikroskopu, že opotřebení destičky bylo $VB = 0,33$ mm což je vidět na obrázku 41.



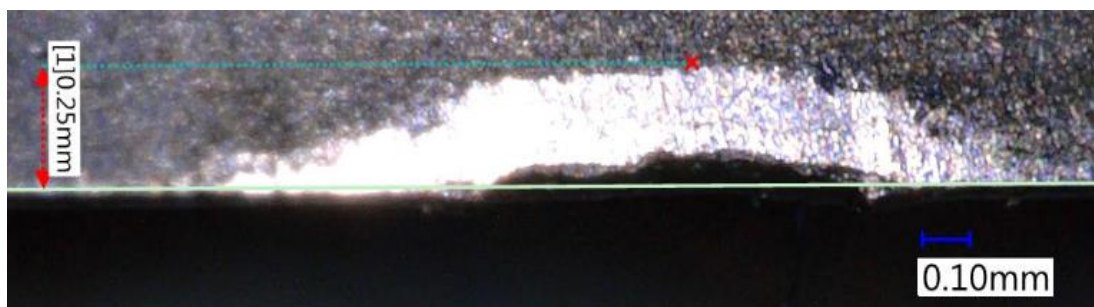
Obrázek 41 opotřebení destičky při posuvu 0,08mm s úhlem čela 9°

Při posuvu na zub $f_z = 0,12$ mm bylo vyhodnoceno pomocí digitálního mikroskopu, že opotřebení destičky bylo $VB = 0,46$ mm což je znázorněno na obrázku 42.



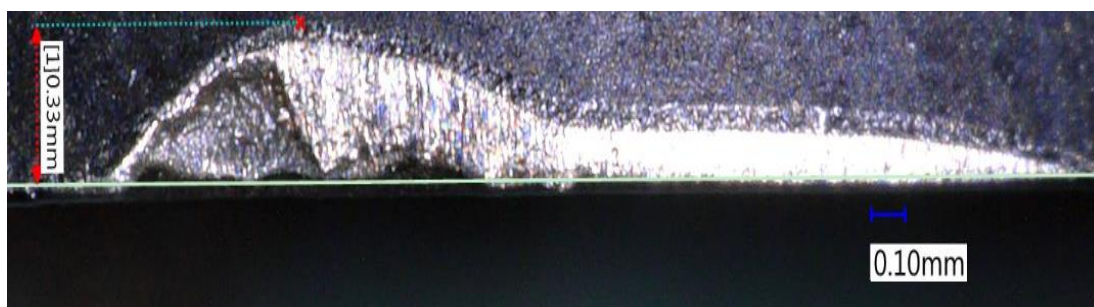
Obrázek 42 opotřebení destičky při posuvu 0,12mm s úhlem čela 9°

U destičky RPHX 1204MOSN s úhlem čela $\gamma_o = 13,5^\circ$ a posuvu na zub $f_z = 0,05$ mm bylo vyhodnoceno pomocí digitálního mikroskopu, že opotřebení destičky bylo $VB=0,25$ mm což vyhodnoceno na obrázku 43.



Obrázek 43 opotřebení destičky při posuvu 0,05 mm s úhlem čela $13,5^\circ$

Při posuvu na zub $f_z = 0,08$ mm bylo vyhodnoceno pomocí digitálního mikroskopu, že opotřebení destičky bylo $VB=0,33$ mm což lze zpozorovat na obrázku 44.



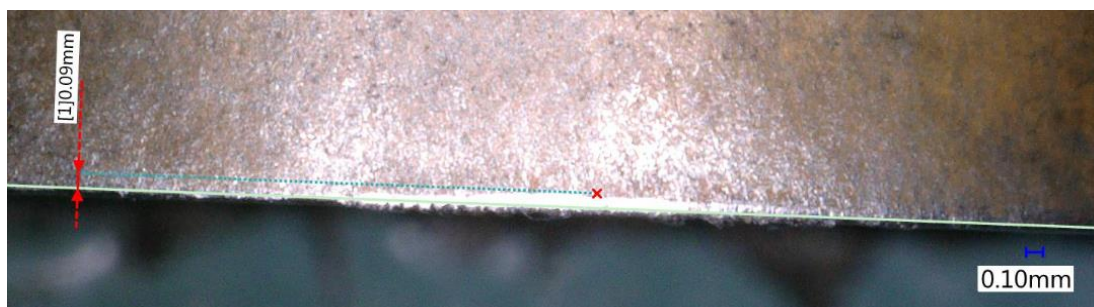
Obrázek 44 opotřebení destičky při posuvu 0,08 mm s úhlem čela $13,5^\circ$

Při posuvu na zub $f_z = 0,12$ mm bylo vyhodnoceno pomocí digitálního mikroskopu, že opotřebení destičky bylo $VB=0,36$ mm což vyplývá z obrázku 45.



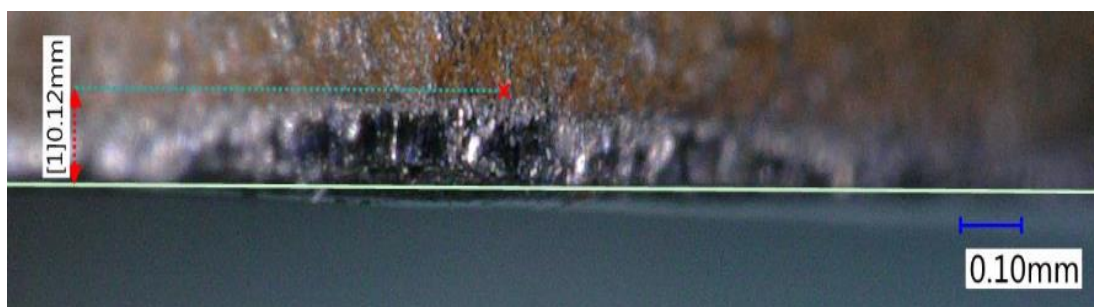
Obrázek 45 opotřebení destičky při posuvu 0,12 mm s úhlem čela $13,5^\circ$

U destičky RCKT 1204MO – PM s úhlem čela $\gamma_o = 13,9^\circ$ a posuvu na zub $f_z = 0,05$ mm bylo vyhodnoceno pomocí digitálního mikroskopu, že opotřebení destičky bylo $VB = 0,09$ mm což lze zpozorovat na obrázku 46.



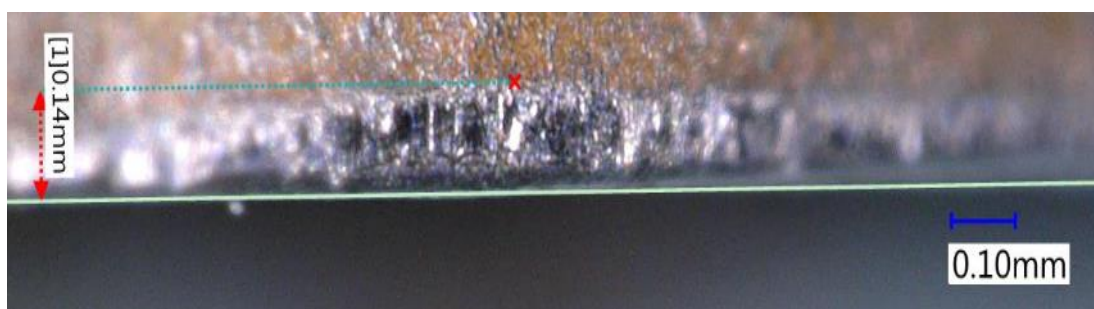
Obrázek 46 opotřebení destičky při posuvu 0,05 mm s úhlem čela $13,9^\circ$

Při posuvu na zub $f_z = 0,08$ mm bylo vyhodnoceno pomocí digitálního mikroskopu, že opotřebení destičky bylo $VB = 0,12$ mm což je vidět na obrázku 47.



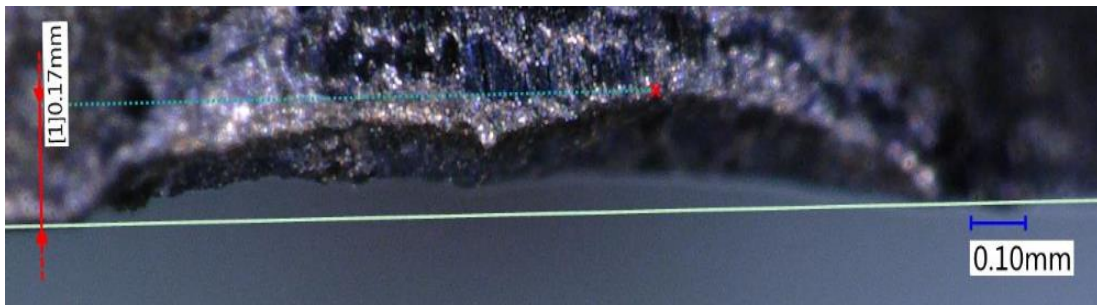
Obrázek 47 opotřebení destičky při posuvu 0,08 mm s úhlem čela $13,9^\circ$

Při posuvu na zub $f_z = 0,12$ mm bylo vyhodnoceno pomocí digitálního mikroskopu, že opotřebení destičky bylo $VB = 0,14$ mm což je znázorněno na obrázku 48.



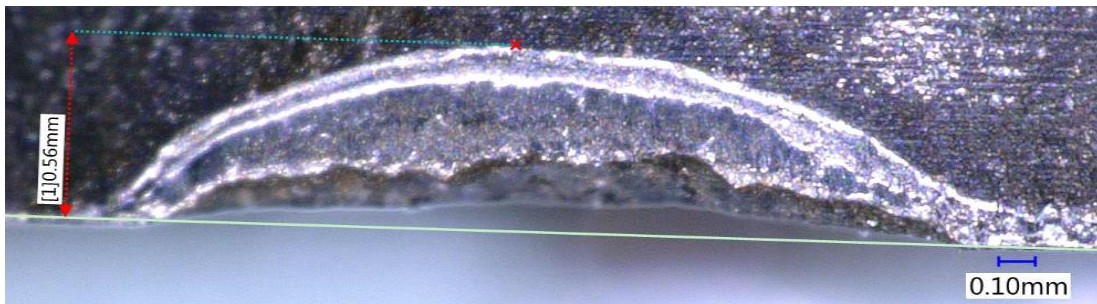
Obrázek 48 opotřebení destičky při posuvu 0,12 mm s úhlem čela $13,9^\circ$

U destičky RPHX 1204M4SN s úhlem čela $\gamma_0 = 18^\circ$ a posuvu na zub $f_z = 0,05$ mm bylo vyhodnoceno pomocí digitálního mikroskopu, že opotřebení destičky bylo $VB = 0,17$ mm což je zobrazeno na obrázku 49.



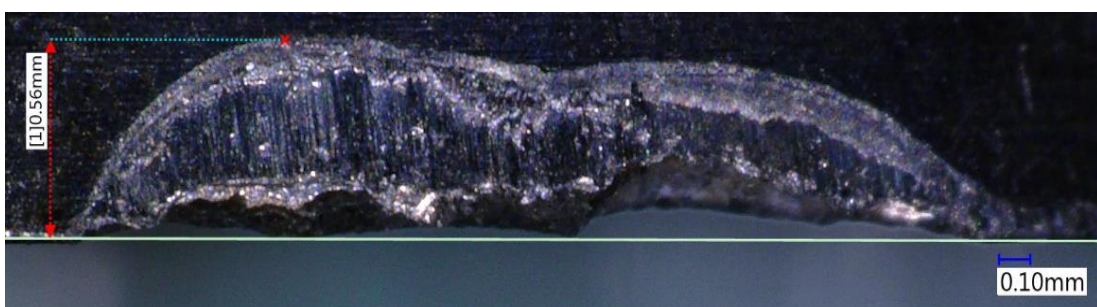
Obrázek 49 opotřebení destičky při posuvu 0,05 mm s úhlem čela 18°

Při posuvu na zub $f_z = 0,08$ mm bylo vyhodnoceno pomocí digitálního mikroskopu, že opotřebení destičky bylo $VB = 0,56$ mm což je vyhodnoceno na obrázku 50.



Obrázek 50 opotřebení destičky při posuvu 0,08 mm s úhlem čela 18°

Při posuvu na zub $f_z = 0,12$ mm bylo vyhodnoceno pomocí digitálního mikroskopu, že opotřebení destičky bylo $VB = 0,56$ mm což je vidět na obrázku 51.



Obrázek 51 opotřebení destičky při posuvu 0,12 mm s úhlem čela 18°

8 Závěr

V úvodní části bakalářské práce jsem představil titan, jeho historii, výrobu čistého titanu a následně rozdělení slitin a popis slitiny, kterou jsem měl možnost obrábět při experimentu. Další kapitola osvětlila průběh obrábění a problematické aspekty, které ovlivňují zpracování titanu a jeho slitin. Následující kapitola byla zaměřena na technologii frézování, která byla využita při experimentu. Díky tomu, že se titan řadí mezi těžkoobrobitelné materiály bylo zapotřebí se zmínit i o zpracování těchto materiálů, a především o zefektivnění procesů při jejich obrábění. Ke konci úvodní části jsem vysvětlil pojem suchého frézování, následovalo uvedení trendů při obrábění titanu a jeho slitin, a nakonec výňatek nejčastěji používaných povlaků pro destičky ze slinutého karbidu vhodné pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů.

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo experimentální měření a následné vyhodnocení naměřených hodnot. Byly vyhodnoceny řezné síly, dosažená integrita povrchu a opotřebení destičky na hřbetu destičky v závislosti na úhlu čela destičky. Experiment byl proveden na Obráběcím centru VMC 500, kdy řezné nástroje byly VBD ze slinutého karbidu, které měly za cíl obrábět titanovou slitinu TiAl6V4.

V experimentální části byly naměřeny všechny potřebné hodnoty pro řezné rychlosti $v_c = (60; 150 \text{ a } 220)$ m/min, kdy jsem zvolil pouze extrémní hodnotu řezné rychlosti pro finální vyhodnocení, která činí $v_c = 220$ m/min, jelikož na nich lze nejlépe předvést opotřebení, které bylo rapidně vyšší v porovnání s nižšími řeznými rychlostmi. Byly využity tři posuvy na zub $f_z = (0,05; 0,08 \text{ a } 0,12)$ mm při využití pěti destiček s úhlem čela $\gamma_o = (0; 9; 13,5; 18; 13,9)$ °. Během hodnocení tohoto experimentu byly využity destičky s různými utvařeči třísky, popřípadě s různými povlaky, což zkrátilo vyhodnocování. V ideálním stavu by bylo neoptimálnější najít destičky od stejného výrobce, se stejnými utvařeči třísky a rovněž se stejným povlakováním k docílení přesnějšího hodnocení experimentu.

Při porovnávání úhlů čela v závislosti na drsnostech, řezných silách a opotřebení destičky na hřbetu destičky jsem vyvodil závěry. Nejlépe vyhodnocené destičky za řezné rychlosti $v_c = 220$ m/min a posuvu na zub $f_z = 0,05$ mm se umístily destička s úhlem čela $\gamma_o = 13,5^\circ$, kdy destička dosahovala nejnižších řezných sil $F_x = 139,4$ N, nižších drsností oproti zbylým destičkám $R_a = 0,218$ μm a $R_z = 1,286$ μm a opotřebení v optimální hodnotě $v_b = 0,25$ mm. Druhá destička, která dopadla příznivě byla destička s úhlem čela $\gamma_o = 13,9^\circ$,

kde sice byla destička vyhodnocena jako nejhorší z hlediska řezné síly, která dosahovala $F_x=181,1$ N, ale z pohledu drsností vyšla jako nejlepší s hodnotami $R_a=0,15$ μm a $R_z=1,083$ μm . Nejlépe se taky umístila z pohledu opotřebení hřbetu destičky, které činilo $v_b=0,09$ mm. Nejhůře dopadla destička s úhlem čela $\gamma_o=0^\circ$, která měla sice nízkou řeznou sílu $F_x=150,4$ N, ale drsnosti dosahovaly $R_a=0,493$ μm a $R_z=2,949$ μm a při hodnocení opotřebení hřbetu destičky dosahovala hodnota $v_b=0,33$ mm.

Při navýšení posuvu na zub $f_z=0,08$ mm vyšlo najevo, že řezná síla není indikátorem, který by měl určovat ideální destičku, protože destička s úhlem čela $\gamma_o=18^\circ$, vychází jako prvotřídní z pohledu sil $F_x=193,6$ N, ale z pohledu drsností, kdy drsnost vycházely $R_a=0,801$ μm a $R_z=3,279$ μm a opotřebením na hřbetu destičky $v_b=0,56$ mm, díky čemuž jsem dospěl k závěru, že tato destička je nevyhovující pro tyto řezné podmínky. Naopak destička s úhlem čela $\gamma_o=13,9^\circ$ vyšla velice bídě z pohledu sil $F_x=256,7$ N, ale z pohledu drsností vyšla lépe $R_a=0,243$ μm a $R_z=1,467$ μm a nejlépe se ukázala z hlediska opotřebení destičky na hřbetu $v_b=0,12$ mm. Z pohledu sil průměrná destička s úhlem čela $\gamma_o=13,5^\circ$ a řeznou silou $F_x=224,5$ N, ale z hlediska drsnosti vynikající $R_a=0,146$ μm a $R_z=0,927$ μm , kde opotřebení destičky na hřbetu dosahovalo $v_b=0,33$ mm.

Při posledním posuvu na zub, který byl $f_z=0,12$ mm jsem zjistil, že destička s úhlem čela $\gamma_o=13,9^\circ$ je sice ze strany řezné síly nejvytíženější $F_x=323,1$ N, ale v případě drsností $R_a=0,204$ μm a $R_z=1,16$ μm a opotřebení hřbetu destičky $v_b=0,14$ mm vyšla prvotřídně, následovala ji destička s úhlem čela $\gamma_o=13,5^\circ$, která dosahovala průměrné řezné síly a to $F_x=290,3$ N, drsnosti $R_a=0,203$ μm a $R_z=1,324$ μm a opotřebení destičky na hřbetu destičky $v_b=0,36$ mm. Sice z pohledu řezné síly dopadla destička s úhlem čela $\gamma_o=13,5^\circ$ kladně s řeznou silou $F_x=281,3$ N, ale z pohledu drsností a opotřebení velice bídě kde se hodnoty dostávaly na $R_a=0,524$ μm a $R_z=2,316$ μm a s opotřebením na hřbetu destičky $v_b=0,56$ mm.

V případě zvolení těchto řezných podmínek, kdy řezná rychlost dosahovala $v_c=220$ m/min a posuvem na zub $f_z=(0,05; 0,08$ a $0,12)$ mm můžu konstatovat, že nejlépe vyhodnocené destičky RPHX 1204MOSN od firmy ceratizit s úhlem čela $\gamma_o=13,5^\circ$ a destička RCKT 1204MO – PM s úhlem čela $\gamma_o=13,9^\circ$ od firmy sandvik i když nedosahovala nejlepších řezných sil.

Ve své bakalářské práci jsem splnil všechny předpoklady a cíle popsané v zadání.

Seznam obrázků

Obrázek 1 Titan a jeho složení [3]	11
Obrázek 2 Schéma výroby titanu Krollovým procesem. [6]	12
Obrázek 3 Krystalické mřížky fází alfa a beta [1]	15
Obrázek 4 Schematické porovnání slitin s různými fázemi [5]	18
Obrázek 5 Nosná část motoru Airbus 380 [14]	19
Obrázek 6 Schéma vzájemného posunutí nástroje s obrobkem [17]	24
Obrázek 7 Frézování čelní a obvodové [18]	24
Obrázek 8 Sousedné a nesousedné frézování [19]	25
Obrázek 9 Parametry ovlivňující životnost nástroje [33]	25
Obrázek 10 Technologie MQL pro vnější a vnitřní užití [21]	26
Obrázek 11 Frézování obrobku [20]	27
Obrázek 12 Schéma pohybu při trochoidním frézování [22]	28
Obrázek 13 Technologie Truemill (obrázek na levé straně) běžná technologie (obrázek na pravé straně). [23]	29
Obrázek 14 Technologie Truemill [23]	29
Obrázek 15 řešení problematiky [23]	29
Obrázek 16 Škála výběru destiček [25]	32
Obrázek 17 Technologie přívodu kapaliny [26]	32
Obrázek 18 Aplikace frézování [27]	32
Obrázek 19 Frézy Garant Master Titan [27]	32
Obrázek 20 Obráběcí centrum VMC 500	35
Obrázek 21 WT pro – A251.63.R.06-12-RS	38
Obrázek 22 Sandvik – R200-088Q32-12M	38
Obrázek 23 Nástrčné frézy v držácích	38
Obrázek 24 3D model polotovaru	39
Obrázek 25 Polotovar	39
Obrázek 26 Fréza JHP780100E2R080.0Z4-M64	39
Obrázek 27 Vyfrézované drážky	39
Obrázek 28 Nastavený obrobek	40
Obrázek 29 První testovací úsek	43
Obrázek 30 3D Model	43
Obrázek 31 Notebook se zesilovačem náboje v provozu	44

Obrázek 32 Rozložení sil na dynamometru.....	44
Obrázek 33 Siloměr.....	45
Obrázek 34 Vyhodnocení sil při záběru pro úhel hlavy 18°.....	45
Obrázek 35 Praktické měření plochy	46
Obrázek 36 Protokol o měření drsnosti	47
Obrázek 37 opotřebení destičky při posuvu 0,05mm s úhlem čela 0°	56
Obrázek 38 opotřebení destičky při posuvu 0,08mm s úhlem čela 0°	56
Obrázek 39 opotřebení destičky při posuvu 0,12mm s úhlem čela 0°	56
Obrázek 40 opotřebení destičky při posuvu 0,05mm s úhlem čela 9°	57
Obrázek 41 opotřebení destičky při posuvu 0,08mm s úhlem čela 9°	57
Obrázek 42 opotřebení destičky při posuvu 0,12mm s úhlem čela 9°	57
Obrázek 43 opotřebení destičky při posuvu 0,05 mm s úhlem čela 13,5°	58
Obrázek 44 opotřebení destičky při posuvu 0,08 mm s úhlem čela 13,5°	58
Obrázek 45 opotřebení destičky při posuvu 0,12 mm s úhlem čela 13,5°	58
Obrázek 46 opotřebení destičky při posuvu 0,05 mm s úhlem čela 13,9°	59
Obrázek 47 opotřebení destičky při posuvu 0,08 mm s úhlem čela 13,9°	59
Obrázek 48 opotřebení destičky při posuvu 0,12 mm s úhlem čela 13,9°	59
Obrázek 49 opotřebení destičky při posuvu 0,05 mm s úhlem čela 18°	60
Obrázek 50 opotřebení destičky při posuvu 0,08 mm s úhlem čela 18°	60
Obrázek 51 opotřebení destičky při posuvu 0,12 mm s úhlem čela 18°	60

Seznam grafů

Graf 1 Závislost řezné síly na posuvu na zub při řezné rychlosti 60 m/min	48
Graf 2 závislost Ra na posuvu na zub při řezné rychlosti 60 m/min.....	49
Graf 3 závislost Rz na posuvu na zub při řezné rychlosti 60 m/min.....	49
Graf 4 závislost řezné síly na posuvu na zub při řezné rychlosti 150 m/min	50
Graf 5 závislost drsnosti Ra na posuvu na zub při řezné rychlosti 150 m/min.....	50
Graf 6 závislost drsnosti Rz na posuvu na zub při řezné rychlosti 150 m/min	51
Graf 7 závislost řezné síly na posuvu na zub při řezné rychlosti 220 m/min	51
Graf 8 závislost drsnosti Ra na posuvu na zub při řezné rychlosti 220 m/min	52
Graf 9 závislost drsnosti Rz na posuvu na zub při řezné rychlosti 220 m/min.....	52
Graf 10 Závislost řezné síly na úhlu čela při prvním úseku	53
Graf 11 Závislost řezné síly na úhlu čela při druhém úseku.....	53
Graf 12 Závislost řezné síly na úhlu čela při třetím úseku	53
Graf 13 Závislost řezné síly na úhlu čela při čtvrtém úseku.....	54
Graf 14 Závislost řezné síly na úhlu čela při pátém úseku	54
Graf 15 Závislost řezné síly na úhlu čela při šestém úseku	54
Graf 16 Závislost řezné síly na úhlu čela při sedmém úseku	55
Graf 17 Závislost řezné síly na úhlu čela při osmém úseku	55
Graf 18 Závislost řezné síly na úhlu čela při devátém úseku	55

Seznam tabulek

Tabulka 1 Chemické složení slitiny [12]	18
Tabulka 2 Rozdělení obrobitelnosti dle materiálu	20
Tabulka 3 Porovnání konstrukční oceli se slitinou Titanu TiAl6V4 [12, 15]	21
Tabulka 4 Shrnutí vlastností nejpoužívanějších povlaků [28, 29, 30, 31]	33
Tabulka 5 Technické parametry VMC 500 [34]	35
Tabulka 6 Vybrané kruhové destičky	36
Tabulka 7 Vizuální znázornění destiček	37

Seznam literatury:

- [1] Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications. Editor Christoph LEYENS, editor M. PETERS. Weinheim: Wiley-VCH, 2003. ISBN 3527305343.
- [2] History Developments and Applications | Titanium Processing Center. Titanium Supplier | Buy Titanium Metal | Titanium Processing Center [online]. Copyright © 2019 Titanium Processing Center [cit. 13.04.2019]. Dostupné z: <https://titaniumprocessingcenter.com/titanium-technical-data/titanium-history-developments-and-applications/>
- [3] Titanium| northsteel| [online]. Center [cit. 13.04.2019]. Dostupné z: <https://www.northsteel.com/titanium/>
- [4] SEDLÁČEK, Vladimír. Únava hliníkových a titanových slitin. Praha: SNTL, 1989. 351 s. ISBN 80-03-00180-3
- [5] DONACHIE, Matthew J. Titanium: a technical guide. 2nd ed. Materials Park, OH: ASM International, c2000. ISBN 08-717-0686-5.
- [6] Suranaree University of Technology. Titanium an its alloys [online]. 2007, 28.8. 2007 [cit. 13.04.2019]. Dostupný z WWW: <www.sut.ac.th/Engineering/Metal/pdf/Nonferrous/05_Titanium%20and%20titanium%20alloys.pdf>
- [7] SEDLÁČEK, Vladimír. Titan a jeho slitiny: výroba, zpracování a použití. Praha: SNTL, 1963. ISBN (váz.).
- [8] Periodická soustava prvků [online]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/22.html#vyroba>
- [9] KURSA, M., SMÍŠEK, V., DRÁPALA, J., LOSERTOVÁ, M., NOGA, Z. Intermetalické sloučeniny Ti – Al a slitiny titanu na jejich bázi. 1. vyd., Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2005, 166 s. ISBN 80-248-0893-5.
- [10] CHRÁST, J.: Slévárenská zařízení. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006, ISBN 80-7204-455-9.
- [11] MACEK, Karel. Kovové materiály. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03513-1.
- [12] RsAlloy – Steels and copper: Sito Ufficiale. 301 Moved Permanently [online]. Copyright © 2013 RS ACCIAI S.r.l All rights reserved [cit. 14.04.2019]. Dostupné z http://www.rsalloys.eu/cmsMateriali/produzioni/47/TiAl6V4_e_02.12.pdf
- [13] Titanium Alloy Ti 6Al-4 V. [online]. Dostupné z: <http://cartech.ides.com/datasheet.aspx?i=101&E=269>
- [14] Polish American Engineers Association. Polish American Engineers Association [online]. Copyright © Polish American Engineers Association [cit. 14.04.2019]. Dostupné z: http://www.polishengineers.org/data/history_activities/18.pdf
- [15] ŽÁK, Jan, Bohumil BUMBÁLEK a Radko SAMEK. Speciální letecké technologie. Brno: Československá redakce VN MON, 1990.
- [16] PÍŠEK, F.; JENÍČEK, L.; RYŠ, P. Nauka o materiálu I: Neželezné kovy. 3. Praha: Academia, 1973. 596 s.
- [17] ELUC. ELUC [online]. [cit. 14.04.2019]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1238>
- [18] Střední průmyslová škola Ostrava – Vítkovice, příspěvková organizace – Úvod. Střední průmyslová škola Ostrava – Vítkovice, příspěvková organizace – Úvod [online]. [cit. 14.04.2019]. Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/texty/texty/PRA/zaklady_frezovani.pdf
- [19] Sousedné frézování nebo nesousedné frézování. Document Moved [online]. Copyright © Sandvik Coromant [cit. 14.04.2019]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/up-milling-vs-down-milling.aspx>
- [20] Suché frézování materiálu Ti6Al4V vysokými rychlostmi. Nejčtenější strojírenský časopis – MM spektrum [online]. Copyright © 2019 www.mmspektrum.com [cit. 14.04.2019]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/suche-frezovani-materialu-ti6al4v-vysokymi-rychlostmi.html>
- [21] Systémy mazání minimálním množstvím maziva SKF LubriLean. [online]. Copyright © Autorská práva [cit. 14.04.2019]. Dostupné z: <https://www.skf.com/cz/products/lubrication-solutions/lubrication-systems/minimal-quantity-lubrication-systems/index.html>
- [22] Proč používat strategii trochoidního frézování? Nejčtenější strojírenský časopis – MM spektrum [online]. Copyright © 2019 www.mmspektrum.com [cit. 14.04.2019]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/proc-pouzivat-strategii-trochoidniho-frezovani.html>

- [23] Technologie TrueMill | surfcam. 3E Praha Engineering – dodávky CAD/CAM/PDM systémů [online]. Copyright © 2009 3E Praha Engineering, a.s. [cit. 14.04.2019]. Dostupné z: <http://3e.devel.bluesystem.cz/surfcam/profesni-cleneni-surfcam/technologie-truemill>
- [24] NESLUŠAN, Miroslav a Andrej CZÁN. Obrábanie titánových a niklových zliatin. Žilina: Žilinská univerzita, 2001. ISBN 80-7100-933-4.
- [25] Nová třída pro frézování MS2050 zvyšuje produktivitu obrábění slitin titanu. Nejčtenější strojírenský časopis – MM spektrum [online]. Copyright © 2019 www.mmspektrum.com [cit. 28.04.2019]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/novinka/nova-trida-pro-frezovani-ms2050-zvysuje-produktivitu-obrabeni-slitin-titanu.html>
- [26] Nové perspektivy v obrábění titanových draků letounů. Nejčtenější strojírenský časopis – MM spektrum [online]. Copyright © 2019 www.mmspektrum.com [cit. 28.04.2019]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nove-perspektivy-v-obrabeni-titanovych-draku-letounu.html>
- [27] Spolehlivě vpřed i v obtížně obrobitelných materiálech. Nejčtenější strojírenský časopis – MM spektrum [online]. Copyright © 2019 www.mmspektrum.com [cit. 28.04.2019]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/spolehlive-vpred-i-v-obtizne-obrobitelnych-materialech.html>
- [28] TiN – nitrid titanu [online]. Copyright © 2019, voestalpine High Performance Metals CZ s.r.o. [cit. 17.05.2019]. Dostupné z: <http://www.bohler-uddeholm.cz/media/TiN.pdf>
- [29] TiCN – karbonitrid titanu [online]. Copyright © 2019, voestalpine High Performance Metals CZ s.r.o. [cit. 17.05.2019]. Dostupné z: <https://www.bohler-uddeholm.cz/media/TiCN.pdf>
- [30] SUPRAL TiAlCN – vícevrstvé povlakování [online]. Copyright © 2019, voestalpine High Performance Metals CZ s.r.o. [cit. 17.05.2019]. Dostupné z: https://www.bohler-uddeholm.cz/media/Supral_TiAlCN.pdf
- [31] EXXTRAL® – plus [online]. Copyright © 2019, voestalpine High Performance Metals CZ s.r.o. [cit. 17.05.2019]. Dostupné z: https://www.bohler-uddeholm.cz/media/Exxtral_plus.pdf
- [32] Suché obrábění snižuje výrobní náklady. Nejčtenější strojírenský časopis – MM spektrum [online]. Copyright © 2019 www.mmspektrum.com [cit. 17.05.2019]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/suche-obrabeni-snizuje-vyrobní-naklady.html>
- [33] Frézování různých typů materiálů. Document Moved [online]. Copyright © Sandvik Coromant [cit. 04.07.2019]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/milling-different-materials.aspx>
- [34] Použité stroje – strojní a průmyslové vybavení – Exapro [online]. Copyright ©2004 [cit. 12.07.2019]. Dostupné z: <https://www.exapro.cz/obrabeci-centrum-vertikalni-tree-vmc-500-p51116120/>
- [35] WNT Katalog 2016–14 Frézy s vyměnitelnými destičkami [online]. WNT, 2016 [cit. 12.07.2019]. Dostupné z: <https://www.wnt.com/cz/download.html>
- [36] Grades S30T and S40T – productivity and security in titanium milling [online]. Copyright ©s [cit. 12.07.2019]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/brochures/en-gb/c-1140-538.pdf>