

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Vliv geometrie na trvanlivost řezného nástroje
v průběhu vysoko rychlostního frézování titanových slitin

The Influence of Geometry on the Cutting Tool Durability
during High-speed Milling of Titanium Alloys

Student:

Bc. Michal Jurčík

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.

Ostrava 2017

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Michal Jurčík**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Vliv geometrie na trvanlivost řezného nástroje v průběhu vysokorychlostního frézování titanových slitin**
The Influence of Geometry on the Cutting Tool Durability during High-speed Milling of Titanium Alloys
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Charakteristika dané problematiky.
3. Návrh experimentální činnosti a stanovení metodiky měření.
4. Zpracování naměřených dat a jejich vyhodnocení.
5. Závěr a doporučení.

Seznam doporučené odborné literatury:

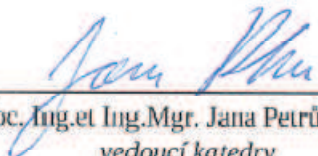
- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [2] HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Brno : MM Publishing Praha, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [3] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017


doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry



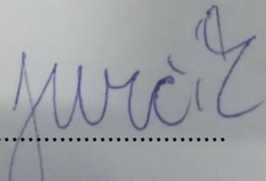

doc. Ing. Ivě Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Miestoprísahné prehlásenie o samostatnom vypracovaní bakalárskej práce

„Miestoprísahne prehlasujem, že som celú prácu, vrátane všetkých príloh, vypracoval samostatne.“

V Ostrave

.....



.....

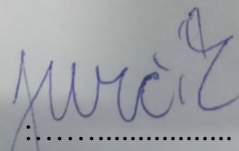
Bc. Michal Jurčík

Prohlašuji, že

- jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu,
- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo,
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3),
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé diplomové práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO,
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona,
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....



.....
Bc. Michal Jurčík

Pod'akovanie

Týmto by som chcel poďakovať vedúcemu mojej diplomovej práce Ing. Tomáši Zlámalovi Ph. D. za cenné rady, trpezlivosť pri vedení mojej diplomovej práce. Za ústretovosť a pomoc pri získavaní potrebných informácií a podkladov.

Práce byla podpořena ze Studentské grantové soutěže Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava v rámci projektů SP2017/147 Specifický výzkum v oblasti výrobních technologií a SP2017/149 Výzkum produktivních a ekologicky úsporných výrobních technologií s cílem zvýšit a podpořit vědecko-výzkumné aktivity studentů doktorských a navazujících magisterských studijních programů ve spolupráci s akademickými pracovníky.

ANOTACIA DIPLOMOVEJ PRÁCE

JURČÍK, M. *Vliv geometrie na trvanlivost rezného nástroje v průběhu vysokorychlostního frézování titanových slitin*: diplomová práce. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2017, 87s, Vedoucí práce: Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.

Diplomová práca sa zaoberá rozborom súčasťných rezných materiálov a ich pracovnej geometrie, testovaním reznej vymeniteľnej doštičky a vplyvu jej geometrie na trvanlivosť rezného nástroja, parametre drsnosti obrábaného povrchu pri frézovaní titánovej zliatiny UNS R56 260. V úvode práce je opísaný súčasný stav obrábania titánu a jeho zliatin, popisom vhodnej geometrie a následné možné dôsledky opotrebenie nástroja pri obrábaní titánu. Experimentálna časť je zameraná na zistenie trvanlivosti nástroja pri rôznych rezných a posuvových rýchlostiach.

KLÚČOVÉ SLOVA: trvanlivosť, frézovanie, rezný materiál

ANNOTATION OF MASTER'S THESIS

JURČÍK, M. *The Influence of Geometry on the Cutting Tool Durability during High-speed Milling of Titanium Alloys*: Master Thesis. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2017, 87p. Thesis head: Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.

The thesis deals with the analysis of the present cutting materials and their working geometry, the testing of the cutting insert and the influence of its geometry on the durability of the cutting tool, the roughness parameters of the machined surface for milling titanium alloy UNS R56 260. The introduction of the thesis describes the current state of machining of titanium and its alloys, A description of the appropriate geometry, and the possible consequent wear effects of the tool in titanium machining. The experimental part is aimed at determining the tool's durability at different cutting and feed speeds.

KEYWORDS: durability, milling, cutting material

Obsah

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV	- 7 -
ÚVOD.....	- 10 -
1 Vlastnosti titánu a jeho zliatin.....	- 11 -
1.1 Zaradenie Titánu a jeho zliatin podľa ISO 513.....	- 11 -
1.2 Titánová zliatina UNS R56 260	- 12 -
2 Obrábanie titánových zliatin.....	- 13 -
2.1 Frézovanie titánu a jeho zliatin	- 13 -
2.2 Mechanizmus tvorby triesky	- 14 -
2.3 Utváranie triesky v závislosti na polohe frézy voči obrobku.....	- 15 -
2.3.1 Súbežné frézovanie.....	- 15 -
2.3.2 Nesúbežné frézovanie.....	- 16 -
2.4 Vysokorýchlostné obrábanie titánu a jeho zliatin	- 17 -
2.5 Obrábanie za sucha	- 19 -
2.5.1 Použitie reznej kvapaliny	- 20 -
2.6 Vysokoposunové frézovanie HFC	- 21 -
2.7 Rezné nástroje	- 22 -
2.7.1 Nástrojový materiál	- 22 -
Rozdelenie spekaných karbidov.....	- 22 -
Nepovlakované spekané karbidy	- 23 -
Povlakované spekané karbidy	- 24 -
Polykryštalický diamant.....	- 25 -
2.7.2 Geometria rezného nástroja.....	- 26 -
2.8 Trvanlivosť.....	- 28 -
2.9 Opatrebovanie nástroja pri frézovaní.....	- 31 -

2.9.1	Mechanizmy opotrebenia nástroja.....	- 32 -
2.9.2	Formy opotrebenia	- 34 -
2.9.3	Klasifikácia typov opotrebenia rezného nástroja	- 35 -
3	Experimentálna časť	- 38 -
3.1	Popis experimentálnej časti.....	- 38 -
3.2	Obrábací stroj	- 38 -
3.3	Obrábací nástroj	- 39 -
3.3.1	Vymeniteľné rezné doštičky.....	- 40 -
3.4	Obrábaný materiál	- 41 -
3.5	Návrh a realizácia skúšky.....	- 42 -
3.5.1	Príklad teoretického výpočtu.....	- 42 -
3.6	Meranie trvanlivosti pri frézovaní titánovej zliatiny UNS R56260	- 46 -
3.6.1	Vyhodnotenie trvanlivosti nástroja a objemu odobratého materiálu.....	- 67 -
3.6.2	Porovnanie parametrov drsnosti Ra a Rz pri frézovaní titanovej zliatiny.....	- 69 -
3.6.3	Zistenie Parametrov rezivosti.....	- 72 -
	Záver	- 74 -
	Zoznam použitej literatúry	- 76 -
	Zoznam obrázkov.....	- 80 -
	Zoznam tabuliek.....	- 82 -
	Zoznam grafov.....	- 84 -

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

Skratka/Symbol	Jednotka	Popis
Al	[-]	hliník
$A\alpha$	[-]	plocha chrbta nástroja
$A\gamma$	[-]	plocha čela nástroja
C	[-]	uhlík
CBN	[-]	kubický nitrid bóru
CFRP	[-]	plasty s uhlíkovými vláknami
CVD	[-]	chemická metóda nanášania povlaku
D	[mm]	vonkajší priemer VBD
$D_{ef.}$	[mm]	efektívny priemer frézy
D_1	[mm]	vnútorný priemer VBD
F_c	[N]	rezná zložka sily rezanai
Fe	[-]	železo
H	[-]	vodík
HB	[-]	tvrdosť podľa Brinela
HC	[-]	povlakované SK
HPC	[-]	vysokoposuvové frézovanie
HSC	[-]	vysokorýchlostné obrábaie
HT	[-]	nepovlakované SK
HW	[-]	nepovlakované SK
KB	[mm]	šírka žliabku
K_f	[mm]	vzdialenosť žliabku od stredu
KM	[mm]	stredná vzdialenosť žliabku
MMC	[-]	kompozit s kovovou maticou
Mo	[-]	molybdén
N	[-]	dusík
NbC	[-]	karbid nióbu

Ni	[-]	nikel
O	[-]	kyslík
PVD	[-]	fyzikálna metóda nanášania povlaku
Q	[cm ³]	objem odobraného materiálu
Ra	[μm]	aritmetická hodnota výšky profilu
Re	[MPa]	mez klzu
Rm	[MPa]	mez pevnosti
Rz	[μm]	naiväčšia výška profilu
SK	[-]	spekaný karbid
Sn	[-]	cín
T	[min]	trvanlivosť
TaC	[-]	karbid tantálu
Ti	[-]	titan
TiAlN	[-]	nitrid titánu a hliníku
TiC	[-]	karbid titánu
TiN	[-]	nitrid titánu
VB	[mm]	opotrebenie chrbta
VB _B	[mm]	priemerne opotrebenie chrbta nástroja
VB _c	[mm]	opotrebenie v oblasti špičky nástroja
VBD	[-]	vymeniteľné rezné doštičky
VB _{max}	[mm]	maximálne opotrebenie
VB _N	[mm]	opotrebenie vo forme vrubu
VR	[mm]	radialné opotrebenie
WC	[-]	karbid Wolframu
Y	[-]	yridium
Zr	[-]	zirkon
ZrN	[-]	nitrid zirkonu
a _p	[mm]	hlbka záberu
c _t , c _v	[-]	konštanta

m	[-]	exponent
t_{As}	[min]	jednotkový strojní čas
v_f	[m·min ⁻¹]	posuvová rýchlosť
α_o	[°]	uhol chrbta v orotgonálnej rovine
γ_o	[°]	uhol čela v orotgonálnej rovine
γ_r	[°]	uhol nastavenia
γ_t	[°]	uhol sklonu fazetky hlavnej reznej hrany

ÚVOD

Diplomová práca je zameraná na vplyv geometrie na trvanlivosť rezného nástroja v priebehu frézovania titánovej zliatiny vysokou posuvovou rýchlosťou. Vysokoposuvové frézovanie je moderná metóda na rýchly odber materiálu. Táto metóda skraca výrobné časy a je v dnešnej dobe hojne rozšírená. Pre vysokú produktivitu je nutné obrábací proces správne optimalizovať. Možnosti každej technológie sú obmedzené, ale pri vývoji nových materiálov je možné túto hranicu posúvať.

Pri vysokoposuvovom frézovaní je kladený dôraz na rezne nástroje a ich trvanlivosť pri vysokom zaťažení. Dôvod je minimalizovať výmeny nástroja a s tým spojené straty. V dnešnej dobe je najrozšírenejší materiál pre obrábacie stroje spekaný karbid (SK), nástroje sa najčastejšie vyrábajú vo forme vymeniteľných rezných doštičiek.

Experimentálna časť diplomovej práce je zameraná na vplyv geometrie na trvanlivosť pri frézovaní titánovej zliatiny UNS R56260. V experimentálnej časti je tiež popísaný priebeh experimentu a jeho meranie. Na záver bolo vykonané vyhodnotenie dosiahnutých výsledkov a bol určené najvhodnejšie pracovné podmienky pre obrábanie tejto zliatiny. Cieľom experimentu je zistenie vplyvu geometrie a rezných parametrov na trvanlivosť rezného nástroja a určiť z jeho rezivosť.

1 Vlastnosti titanu a jeho zliatin

Titan je polymorfný kov s nízkou hustotou, vynikajúcou odolnosťou voči korózií a nadpriemernými mechanickými vlastnosťami. Čistý titan je húževnatý kov charakterizovaný nízkou hustotou ($4500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), pričom jeho mez pevnosti rastie úmerne s jeho čistotou (290-600 MPa). Dobrá korózna odolnosť titanu umožňuje jeho aplikáciu pri výrobe náradia v chemickom priemysle, ďalej sa môže titán používať pri zariadeniach, ktoré pracujú dlhodobo v styku so slanou vodou (súčiastky ponoriek, ropne plošiny, lodné skrutky). V dnešnej dobe sa vo veľkej miere titan uplatňuje aj v medicíne pri výrobe kostných implantátov, kĺbových náhrad, atď. Vysoká húževnatosť a pevnosť pri nízkej hmotnosti sa využíva pri kozmických technológiách, leteckom priemysle (výroba turbínových lopatiek).

Už aj nepatrné množstvo prímiesí môže zásadne ovplyvniť tieto vlastnosti. Hlavným legujúcim prvkom je hliník, pričom ďalšie legujúce prvky sú vanád, molybdén, chróm, mangán, niób, cín, zirkon a uhlík. Tvrdosť a pevnosť zvyšuje mangán, obsah uhlíku do 0,2 % hm. zvyšuje pevnosť pri zachovaní plasticity. [1, 5]

1.1 Zaradenie Titánu a jeho zliatin podľa ISO 513

Kovoobrábací priemysel v dnešnej dobe produkuje veľmi široké spektrum obrábaných materiálov. Každý materiál má svoje špecifické vlastnosti, ktoré sú ovplyvňované prísadovými prvkami, tepelným spracovaním, tvrdosťou, atď. Všetky tieto vlastnosti majú veľký vplyv na voľbu geometrie a triedu obrábacieho nástroja a rezných podmienok. Obrábané materiály boli preto rozdelené do šiestich hlavných skupín vid'. obr.1.1 v súlade s normami ISO, pričom každá skupina má z hľadiska obrábania svoje špecifické vlastnosti. Podľa normy ISO 513 bol titán a jeho zliatiny zaradené do skupiny ISO S. Do skupiny ISO S spadajú žiaruvzdorné super zliatiny, ktoré zahrňujú celú radu vysoko legovaných ocelí a materiálov na bázi niklu, kobaltu a samozrejme titánu. Tieto materiály veľmi ľahko prilnú k reznému klinu a tvoria nárastok, behom ich obrábania dochádza k spevňovaniu a k tvorbe veľkého množstva tepla. Materiály, ktoré spadajú do tejto skupiny sú podobné materiálom zo skupiny ISO M. Pri obrábaní materiálov skupiny ISO S dosahuje životnosť rezného klinu veľmi malé hodnoty. [6]



Obr. 1.1 Prehľad rozdelenia obrábaných materiálov do skupín podľa ISO 513 [6]

1.2 Titánová zliatina UNS R56 260

UNS R 56 260 je tepelné spracovaná alfa-beta zliatina navrhnutá na zvládanie vysokých teplôt a zaťažujúcich síl. Prímes kremíka v 0,008 hm% zaručí zvýšenie pevnostných vlastností za nízkych teplôt. Je používaná na výkovky, ktoré sa používajú v prostrediach so stredne zvýšenými teplotami, ďalej sa používa na výrobu turbínových motorov, obzvlášť sa používa pri výrobe kompresorových diskov a turbínových lopatiek. Zliatina sa taktiež používa pri nízkych teplotách ako Ti-6242S, avšak je považovaná za zliatinu používanú do teplôt 400°C, po krátky čas však dokáže zvládať zaťaženie a teplotu do 540°C. Ďalej je táto zliatina používaná všade tam, kde je potrebná vysoká pevnosť, nízka hmotnosť a dobrá odolnosť voči korózií. Tým sa oblasť používania rozširuje na hriadele a púzdra do prostredia s ropou a zemným plynom. Zliatina taktiež veľmi dobre zvláda kontakt s morskou vodou. [2]

Tab. 1.1 Chemické zloženie titánovej zliatiny Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo [3]

Chemické zloženie						
Prvok	C	H	Mo	N	Fe	Ti
hm%	0,008	0,0038	6,01	0,008	0,07	bal
Prvok	Al	O	Sn	Zr	Y	
hm%	6	0,1	2,01	3,95	<0,0004	

Tab. 1.2 Mechanické vlastnosti titánovej zliatiny UNS R56260 [3]

Typické mechanické vlastnosti	
Mez pevnosti [MPa]	1120
Mez klzu [Mpa]	1210
Modul pružnosti [GPa]	114
Elasticita [%]	13.00
Tvrdosť podľa Brinella[HB]	360

2 Obrábanie titánových zliatin

Drvivá väčšina titánových zliatin sa vo všeobecnosti zaraďuje do kategórie ťažko obrábateľných materiálov. Tvrdosť titánových zliatin sa pohybuje v rozmedzí 210 až 390 HB. Titán je prvok, ktorý reaguje so všetkými známymi reznými materiálmi a spôsobuje veľmi rýchle opotrebenie rezného nástroja a zvýšenie rezných síl. Vysoká teplota tavenia a nízka vodivosť tepla zapríčiňuje, že v mieste rezu vzniká vysoká teplota a tým sa zvyšuje riziko plastickej deformácie rezného klina. Pri obrábaní titánu a titánových zliatin dochádza k zmenšeniu plochy medzi nástrojom a obrobkom, a to spôsobuje nadmerné tepelné a mechanické namáhanie rezného klina. Pri obrábaní titánu by mal obrábací stroj splňovať tieto základné podmienky: [4]

- používanie vysokých posunových rýchlostí,
- zabezpečenie rovnomerného a neprerušovaného rezu,
- sústava by mala mať čo najvyššiu tuhosť (prevencia proti vibráciám a kmitaniu pri obrábaní),
- používanie procesných kvapalín (odvod tepla, čistenie miesta rezu).

2.1 Frézovanie titánu a jeho zliatin

Veľmi rozšírenou a obľúbenou metódou trieskového obrábania titánu je frézovanie. Medzi najväčšiu prednosť tejto metódy je veľký frézovací výkon pri dosiahnutí kvalitne obrobeného povrchu. V súčasnosti môžeme frézovaním obrábať rovinné, tvarové a rotačné plochy. Podľa polohy osi rezného nástroja voči obrábanej ploche rozlišujeme valcové, čelné a okružovacie frézovanie. Podľa smeru otáčania frézovacieho nástroja a posuvu voči obrobku rozlišujeme tieto druhy frézovania: súbežne a protibežné.

Výhody súbežného frézovania: [5]

- smerovanie reznej sily do materiálu(zníženie upínacích síl),
- zvýšenie posuvu na zub f_z pri rovnakej trvanlivosti,
- zlepšenie kvality povrchu (zmenšenie chvenia).

Asi najväčšou nevýhodou súbežného frézovania je rázové zaťaženie VBD pri počiatocnej fáze záberu, kedy je maximálna šírka záberu. Naproti tomu, pri protibežnom frézovaní sa rezný klin vrýva do materiálu s minimálnou šírkou záberu, ktorá sa postupne zväčšuje. V skutočnosti však dochádza k rezaniu až vtedy, ak je hrúbka odrezávanej vrstvy väčšia ako veľkosť polomeru zaoblenia nástroja. Pri menšej hrúbke odoberaného materiálu dochádza len k pružnej deformácii alebo plastickej deformácii povrchu obrábanej súčiastky. Pri nesúbežnom frézovaní dochádza v okamihu záberu rezného klina do obrábanej plochy ku vzniku veľkého lokálneho tlaku medzi nástrojom a obrobkom, čo môže viesť k lomu rezného klina.

Rezné materiály s ktorých sa vyrábajú frézovacie nástroje sa vždy musia voliť podľa typu a vlastností obrábaného materiálu. Najrozšírenejší materiál na výrobu frézovacích nástrojov je spekaný karbid, ktorý by mal disponovať vysokou húževnatosťou (zvýšený obsah kobaltu). Taktiež nie je odporúčané používať VBD zo skupiny P, ktoré obsahujú karbid titánu (TiC). Karbid titánu obsiahnutý vo VBD zapríčiňuje difúzne pôsobenie rezného materiálu s obrobkom.

2.2 Mechanizmus tvorby triesky

Rozbor mechanizmu tvorenia triesky pri obrábaní titánu vedie k niektorým zásadným poznatkom. Postupnosť javov pri tvorení segmentovej triesky možno rozdeliť na dve základné štádiá. V prvom štádiu zaznamenávame plasticкую nestabilitu, ktorá vedie k lokalizácii deformácie pozdĺž plochy šmykovej roviny. Táto plocha začína na reznej hrane a je najskôr orientovaná v smere vektora reznej rýchlosti, potom sa ohýba smerom nahor, kde sa pretne s obrábanou plochou. Šmykové porušenie triesky sa objavuje na vonkajšej strane vo forme trhlín a na vnútornej strane vo forme zdeformovaných pásov. [35]

V druhom štádiu vzniká postupné vyrovnávanie sklonenej strany triesky, orientovanej k obrábanému materiálu, v dôsledku premiestňovania nástroja. V dôsledku toho bude hrúbka triesky približne rovná ako hrúbka odrezávanej vrstvy ap. To viedlo viacerých autorov k mylnému záveru, že pri sústružení titánu je veľmi veľký uhol hranice primárnych deformácií ($\phi = 45^\circ$). To by však znamenalo, že stlačenie triesky je rovné jednej. Tento proces deformácie v tomto úzkom páse je s veľkou pravdepodobnosťou adiabatickým šmykom. Porušenie vzniká v dôsledku stlačenia od

susedných vrstiev kovu. Po stranách triesky je materiál voľný a ničím nepridržiavaný, čo dovoľuje segmentu rozširovať sa a tým vznikajú trhliny. Tvorenie segmentov sa začína vyrovnávaním elementov klinového tvaru pred nástrojom. Počiatočný kontakt čela nástroja s vytváraným segmentom je veľmi krátky a dĺžka kontaktu rastie s premiestňovaním noža. V tomto štádiu takmer prestáva relatívny pohyb medzi segmentom a čelom noža, kým sa plocha segmentu, ktorá je v kontakte s čelom noža nevyrovná. V tomto štádiu je intenzívny prenos tepla stykovej plochy noža a stimuluje sa chemická reakcia medzi trieskou a nožom, čo môže viesť k zrýchlenému opotrebovaniu noža. Postupné stlačovanie rodiaceho sa elementu triesky vytlačí segment triesky smerom nahor.

Rýchlosť pohybu triesky pozdĺž čela noža bude rovnaká, ako rýchlosť stlačovania elementárnej triesky. Pretože šmyk vznikol a rýchlo sa rozširuje, bude posúvať vznikajúci segment v smere rovnobežne s „plochou šmyku“. To v podstate urýchli premiestňovanie segmentu triesky. Táto časť cyklu, ktorá je špecifická pohybom segmentu po čele nástroja má periodické zabrzdzenia, ktoré má tú zvláštnosť, že pre stlačenie segmentu je potrebná iba minimálna sila. Opisovaný mechanizmus má veľký vplyv na dynamiku rezného procesu. Rezná sila F_c rastie pri vzniku segmentu triesky a v momente počiatku šmyku a tvorenia trhliny prudko klesá. Tým sa znižuje zaťaženie noža a nôž sa vracia do počiatočnej polohy. Tento proces sa opakuje, pričom vznikajú silné vibrácie a v niektorých prípadoch môže dôjsť k únavovému porušeniu rezného klina. Deformácia segmentu triesky sa dá opísať aj metódami teórie plasticity v porovnaní s procesom tvorby plynulej triesky. [35]

2.3 Utváranie triesky v závislosti na polohe frézy voči obrobku

2.3.1 Súbežné frézovanie

Pri súbežnom frézovaní sa rezný nástroj posúva súhlasne so smerom otáčania vid'. obr. 2.1. Súbežné frézovanie by sa malo preferovať pred nesúbežným vždy, keď to podmienky nastavenia stroja, nástroja, prípravku a obrobku umožnia. Hlavným poznávacím rysom súbežného frézovania je meniaci sa prierez triesky od maximálnej po minimálnu hodnotu vid'. obr.2.1. Veľký prierez triesky by mal byť priaznivý, a rezné sily majú tendenciu priťahovať obrobok smerom k nástroju a udržiavať rezný klin v zábere. Pri súbežnom frézovaní by mala byť vymedzená vôľa medzi posuvnou

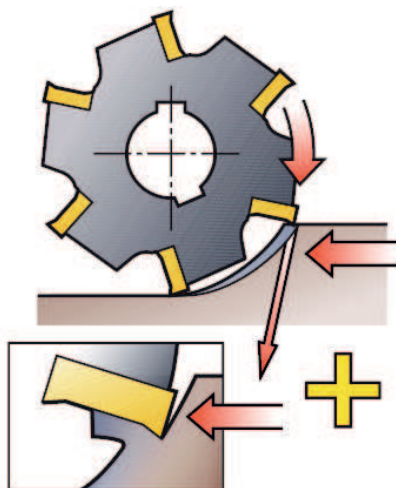
skrutkou a maticou stola, pri nesplnení tejto podmienky môže dôjsť k poškodeniu nástroja a v niektorých prípadoch aj stroja. [6]

Výhody:

- vyššia trvanlivosť nástroja,
- použitie vyšších rezných rýchlostí a posuvov,
- jednoduchšie upnutie obrobku,
- obrobená plocha dosahuje vysokú kvalitu.

Nevýhody:

- horšie obrábanie tvrdých a znečistených materiálov,
- silové zaťaženie každého zubu pri zábere.



Obr. 2.1 Schéma súbežného frézovania [6]

2.3.2 Nesúbežné frézovanie

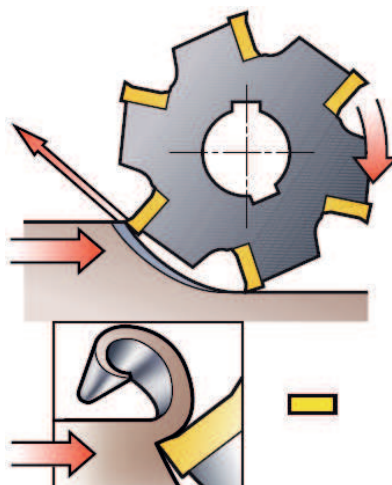
U nesúbežné frézovania je smer posunovej rýchlosti rezného nástroja opačný ako je smer jeho rotácie vid'. obr.2.2. Prierez triesky sa mení od minimálnej po maximálnu hodnotu vid'. obr.2.2. Rezné sily majú tendenciu tlačiť rezný nástroj a obrobok od seba. V okamžiku, keď opustí rezný klin záber, dochádza k ťahovému zaťaženiu, čo má za následok rýchle poškodenie rezného nástroja. Nevýhodou je, že rezný klin na začiatku záberu kľže po obrobenej ploche. Z tohto dôvodu dochádza k zvyšovaniu trenia, čo spôsobí nárast teploty opotrebovania nástroja. Táto skutočnosť zhoršuje kvalitu obrobenej plochy. [6]

Výhody:

- menšie opotrebenie stroja,
- záber zuba nezáleží na hĺbke rezu,
- na trvanlivosť nástroja nemá vplyv povrch obrobku.

Nevýhody:

- horšia kvalita obrobenej plochy,
- smer pôsobenia síl frézovania.



Obr. 2.2 Schéma nesúbežného frézovania [6]

2.4 Vysokorýchlostné obrábanie titánu a jeho zliatin

Neustála potreba znižovania strojných časov a zvyšovania produktivity pri obrábaní titánu a jeho zliatin má za následok stále častejšie využívanie vysokorýchlostného obrábania. Z hľadiska rezných rýchlostí je veľmi zložitá jednoznačne a presne stanoviť hranice kde začína a končí vysokorýchlostne obrábanie. Označenie vysokorýchlostné obrábanie navrhol Carl Salomon v roku 1931. Vysokorýchlostné obrábanie má špecifické využitie vo výrobnom procese. Metóda HSC pracuje pri reznej rýchlosti 5x až 10x väčšej oproti konvenčnému frézovaniu. Stroje pre HSC obrábanie môžu byť klasické konvenčne ale aj číslicovo riadené, ktoré dosahujú otáčky frézovacích vretien $10000-80000 \text{ min}^{-1}$. Rezné rýchlosti pri obrábaní titánu sa pohybujú v rozmedzí 150 až $1000 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Je všeobecne známe, že s nárastom reznej rýchlosti je nástroj vystavovaný väčšiemu nárastu intenzity

opotrebenia, preto je dôležité správne určiť optimálnu krivku opotrebenia s ohľadom na doporučené rezne podmienky. Posunové rýchlosti dosahujú rýchlosti $10-40 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, rýchlo posuv dosahuje rýchlosť $90-120 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. [7, 8]

Tab. 2.1 Rezné rýchlosti pri HSC z hľadiska materiálov a obrábacej operácie [34]

Materiál	Rezná rýchlosť [m·min⁻¹]	Obrábacie operácie	Rezná rýchlosť [m·min⁻¹]
Oceľ	800-1100	Sústruženie	800-8000
Zliatiny Ti	100-150	Vŕtanie	100-1100
Zliatiny Ni	160-280	Frézovanie	560-6000
Liatina	900-1600	Pret'ahovanie	12-70
Zliatiny Al	3000-6000	Vystružovanie	10-250
Bronz, mosadz	1100-3000	Brúsenie	6000-9500
Plasty	2800-8000	Rezanie	70-200

Rozdiel medzi konvenčným a HSC frézovaním je v reznej rýchlosti a mechanizme akým sa tvorí trieska. Pri vysokých rezných rýchlostiach sa teplota triesky blíži k teplote tavenia obrábaného materiálu. Tým sa menia jej mechanické vlastnosti. Pri skúmaní rezného procesu bolo zistené, že čím vyššia je rezná rýchlosť, tým menšia je oblasť primárnej plastickej deformácie v oblasti koreňa triesky, tým pádom sa skôr dosiahne medze pevnosti v strihu a dôjde k oddeleniu triesky v rovine strihu pod strižným uhlom Φ . Trieska po prechode rovinou strihu takmer skokovo zvýši svoju teplotu, zmäkne a zníži sa sila, ktorou pôsobí trieska na čelo nástroja. To zapríčini zmenšenie rezného odporu a taktiež sa zníži trecia sila medzi nástrojom a trieskou, čím sa zníži aj celková rezná sila. Vďaka rýchlemu odchodu triesky z miesta rezu nedôjde k dodatočnému zahriatiu vplyvom trenia a taktiež trieska nestačí odovzdať svoje teplo do nástroja ani do obrobku. Odvedenie približne 99 % všetkého vzniknutého tepla zvýši presnosť obrábania a trvanlivosť nástroja.

Voľbu materiálu rezného nástroja na obrábanie titánových zliatin najviac ovplyvňuje rezná rýchlosť. Rýchlorezná oceľ je nevhodná, lebo znesie rezné rýchlosti do $50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Použitie polykrýštalického diamantu a kubického nitridu bóru je vhodné, cena je však veľmi vysoká a materiály majú tiež vysokú citlivosť na adhéziu. Rezná keramika a cermety sa nepoužívajú pri obrábaní titánu z dôvodu vysokej intenzity opotrebenia. Ako najvhodnejšia voľba rezného materiálu sa javí použitie jemnozrnných spekaných karbidov na báze WC s viacvrstvými povlakmi TiN a (TiAlSi) nanášaných metódou PVD.

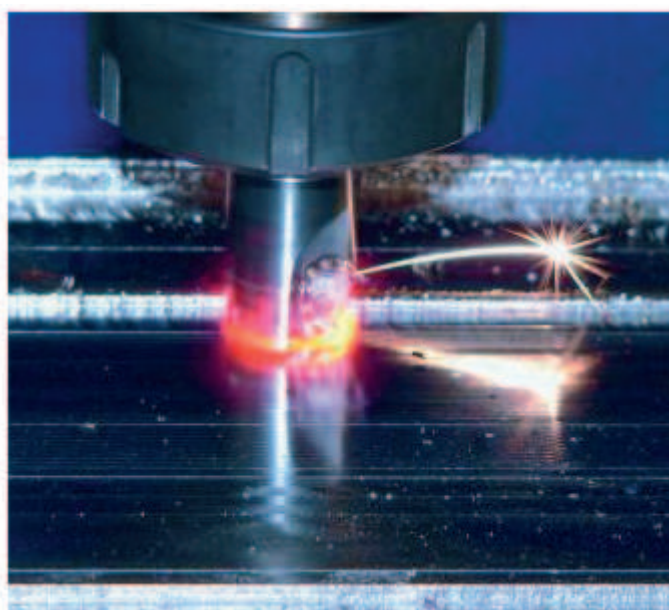
Geometria rezného nástroja sa odporúča vždy pozitívna. Veľké hodnoty uhlu chrbta majú za následok zníženie tuhosti nástroja a taktiež nepriaznivo vplyva na dynamické chovanie celej sústavy. Uhol sklonu skrutkovice λ ovplyvňuje odvod triesky z miesta rezu a má vplyv na hromadenie triesky v zubovej medzere.

Výhoda vysokorýchlostného obrábania oproti konvenčnému obrábaniu je v tom, že pri rovnakej hrúbke odoberaného materiálu (triesky) sa pri zvýšenej reznej rýchlosti zvyšuje hodnota posunu, čím sa dosahuje vyšší odber materiálu až o 30 % za jednotku času. HSC obrábanie dosahuje lepšiu akosť povrchu, ktoré môže v niektorých prípadoch celkom nahradiť dokončovacie metódy a tým skrátiť celkový čas výroby. Avšak ako všetky technológie aj technológia HSC má svoje nevýhody. Vysoké rezné rýchlosti zapríčiňujú zvýšené riziko úrazu obsluhy stroja vplyvom rýchlo sa pohybujúcich častí stroja. Výrobca stroja musí toto riziko brať do povedomia a musí zabezpečiť dostatočnú ochranu (nepriestrelné kryty a sklo). Aby sa predišlo závažným poruchám musia sa vykonávať pravidelné kontroly zamerané na únavové trhliny a opotrebovanie súčiastok. [9, 12]

2.5 Obrábanie za sucha

Cieľom suchého obrábania je minimalizovanie alebo úplne vylúčenie reznej kvapaliny z procesu obrábania, pri vylúčení týchto kvapalín sa náklady na ich obstarávanie, údržbu a likvidáciu zredukujú na minimum. Taktiež odpadávajú vedľajšie práce ako je čistenie (odmasťovanie) výrobkov. V dnešnej dobe sú používané vysoké rezne rýchlosti, ktoré spôsobujú zahrievanie rezného klina na vysoké teploty. V niektorých prípadoch sa teploty rezného klina pohybujú aj nad hranicou 1000°C . To

znamená, že chladiaca kvapalina sa po privedení k miestu rezu takmer okamžite vyparí a jej chladiaci účinok tak nemá praktický žiaden význam. Problém však spočíva v tom, že rezná kvapalina rezný klin ochladí v čase keď nie je v reze. Táto skutočnosť spôsobí tepelne rázy, cyklické tepelné namáhanie, v dôsledku čoho môžu vzniknúť na nástroji tepelné praskliny. To má za následok zníženie životnosti nástroja. V prípade takéhoto obrábania je vhodné odvádzať triesku z miesta rezu použitím stlačeného vzduchu, zabránime tým opätovnému prerezávaniu triesky. Za určitých okolností napr. pri dokončovacom obrábaní titánu a jeho zliatin je použitie reznej kvapaliny vhodné z dôvodu obmedzenia tvorby toxického prachu. [10]

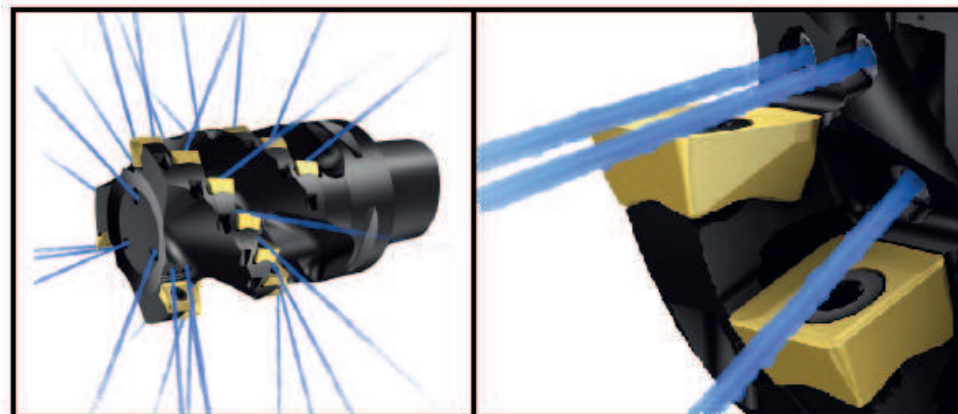


Obr. 2.3 HCS obrábanie titánovej zliatiny [10]

2.5.1 Použitie reznej kvapaliny

Na rozdiel od frézovania ostatnej väčšiny materiálov sa odporúča pri obrábaní titánu vždy používať reznú kvapalinu. Žiaruvzdornosť titánu spôsobuje, že pri obrábaní je zásadne účinné chladenie nástroja pomocou reznej kvapaliny, účinné chladenie zabráni prehriatiu rezného klina a čela nástroja. Použitie reznej kvapaliny pomáha pri odvode triesky z miesta rezu, kontrole teploty a funguje tiež ako prevencia proti prerezávaniu triesky. Ak to dovoľujú prevádzkové pomery je treba vždy preferovať vysoko tlaky prívod reznej kvapaliny s tlakom okolo 7 MPa s prívodom cez vreteno. Pri použití vonkajšieho prívodu reznej kvapaliny sa odporúča nízko tlaky prívod







kvapaliny. V prípade použitia karbidových rezných doštičiek je vhodné použiť prívod reznej kvapaliny frézovacím nástrojom. [11]



Obr. 2.4 Príklad prívodu reznej kvapaliny frézovacím nástrojom CoroMill 690 [11]

2.6 Vysokoposunové frézovanie HFC

Technológia vysokoposunového frézovania HFC spočíva v odoberaní materiálu pri pomerne malej veľkosti hĺbky záberu a_p (cca $0,5 \div 2,0$ mm), avšak posunová rýchlosť v_f dosahuje v niektorých prípadoch až 10 násobné hodnoty. Vďaka vysokej rýchlosti posuvu je metóda HFC až trikrát produktívnejšia ako konvenčné frézovanie. Pri HFC frézovaní pôsobí výsledná sila do vretena stroja, čo umožňuje väčšiu stabilitu rezného procesu a zníženie vibrácií. Výrobcovia rezných nástrojov odporúčajú používať frézy s malým uhlom nastavenia alebo doštičky s kruhovým tvarom. Metóda je vhodná skôr na hrubovacie práce pri čelnom frézovaní, v niektorých prípadoch je vhodná tiež pri frézovaní otvorov a drážok. Pri frézovaní kapsy má veľký vplyv na produktivitu voľba správnej stratégie obrábania. [13, 14]

	CoroMill® 210	CoroMill® 316	CoroMill® Plura
			
	Frézy pre veľké rýchlosti posuvu		
Max. hĺbka rezu (a_p),mm	1.2 – 2	1.3	1.3
Priemer frézy (D_c),mm	25 – 160	10 – 25	4 – 20
Materiál			

Obr. 2.5 Frézy vhodné pre HFC od firmy SANDVIK Coromant [13]

2.7 Rezné nástroje

2.7.1 Nástrojový materiál

Nástrojové materiály sa vyznačujú rôznou kombináciou tvrdosti, húževnatosti a odolnosť voči opotrebeniu a je ich možné rozdeliť do celej rady tried so špecifickými vlastnosťami. Obecne sa dá povedať, že vhodný rezný materiál by mal byť: [15]

- tvrdý a odolný voči opotrebeniu a plastickej deformácii,
- húževnatý a odolný voči lomu,
- nemôže reagovať s obrábaním materiálom,
- chemický stabilný, aby odolával oxidácií a difúzií,
- odolný voči kolísaniu teplôt.

Rozdelenie spekaných karbidov

Spekaný karbid sa vyrába z rôznych karbidov a spojiva, medzi najpoužívanejšie karbidy patrí karbid wolframu WC, karbid titánu TiC, karbid tantalu TaC a karbid nióbu NbC. Ako spojivo sa používa vo väčšine prípadov kobalt Co. Spekané karbidy sú

zmesou niekoľkých fáz, zvyčajne 2 až 3 fázy, SK nie je možné po dokončení výroby ďalej tepelne spracovávať. Obsah jednotlivých fáz ovplyvňuje ich mechanické vlastnosti ako húževnatosť, tvrdosť, odolnosť voči oteru a opotrebeniu. Spekané karbidy pre obrábacie práce obsahujú viac než 80 % tvrdej zložky, napr. WC. [16]

Označovanie spekaných karbidov podľa ISO ČSN 513:

- HW - nepovlakované SK na báze WC,
- HT - nepovlakované SK na báze karbidu titánu TiC a nitridititanu TiN a ich kombinácií,
- HC - povlakované SK (HW,HT).

Spekané karbidy sa rozdeľujú do šiestich rozličných skupín, ktoré sú navzájom rozlíšené farebným a číselným značením. Podskupiny sa značia dvojmiestnym číslom, ktoré vyjadruje ich základné mechanické vlastnosti. S rastúcim číslom podskupiny klesá húževnatosť a pevnosť v ohybe a naproti tomu tvrdosť a oteruodolnosť narastá. Pre obrábacie práce titánu a jeho zliatin sa využíva prednostne **skupina S**, ktorá zaručuje dobrú obrábateľnosť titánu. [15]

Nepovlakované spekané karbidy

Táto trieda sa z veľkej časti skladá z WC/Co, alebo obsahuje veľké množstvo kubických karbonitridov. Typickou aplikáciou je obrábanie žiaruvzdorných zliatin alebo titánových zliatin. Rýchlosť opotrebenia u nepovlakovaných SK je rýchla, ale kontrolovaná, pričom sa prejavuje samo ostriaci efekt.

Nepovlakované SK sa rozdeľujú podľa použitia do troch skupín: [15, 16]

- **Spekané karbidy typu P** – majú zloženie WC, TiC, Co, sú určené pre obrábanie železných kovov, kde vzniká dlhá trieska,
- **Spekané karbidy typu M** – majú zloženie WC, TiC, TaC, Co, sú určené pre obrábanie železných kovov, kde vzniká dlhá a krátka trieska a obrábanie neželezných kovov (mangánová a austenitická oceľ),
- **Spekané karbidy typu K** – majú zloženie WC, Co, sú určené pre obrábanie železných kovov, kde vzniká krátka trieska (šede liatiny, neželezné kovy, meď, bronz, hliník).

Povlakované spekané karbidy

Ideálna rezná doštička by mala mať tvrdý a oteru odolný povrch pri zachovaní veľmi húževnatého jadra. Túto požiadavku ideálne spĺňajú VBD zo spekaného karbidu s prídavnou povrchovou vrstvou. Na povlaky VBD sa v súčasnej dobe používa karbid titanu TiC, nitrid titanu TiN, oxid hlinitý Al₂O₃ alebo TiAlN. Nanášané povlaky môžu byť jedno alebo viac vrstve a môžu obsahovať jednu alebo viac prímiesí. Povlaky sa nanášajú metódami CVD a PVD. [15]

Moderné povlakované SK získali behom svojho historického vývoja značné výkonnostné a spoľahlivé vlastnosti. Zvyčajne sa uvádzajú štyri generácie ich vývoja. Povlaky 3. generácie sú viacvrstvé povlaky, ktoré obsahujú 2 až 3 vrstvy s ostro ohraničenými prechodmi medzi jednotlivými vrstvami. Riadenie vrstiev býva väčšinou takéto: TiC – Al₂O₃, TiC – TiN, TiC – TiCN – TiN, TiC – Al₂O₃ – TiN, TiCN – Al₂O₃ – TiN. Povlaky 4. generácie sú mnohvrstvé povlaky (v niektorých prípadoch viac ako 10 vrstiev a medzivrstiev) s menej výraznými prechodmi medzi jednotlivými vrstvami. [15, 18]

Tab. 2.2 Vlastnosti vybraných povlakov [19]

Povlak	Farba povlaku	Tvrdosť HV	Hrúbka [μm]	Max. teplota použitia [°C]	Použitie
TiN	zlatá	2400	1-7	600	univerzálne
TiAlN	čirnofialová	3300	1-4	800	stabilné rezy
TiCN	šedomodrá	3400	1-4	400	prerušované rezy
AlTiN	čierna	3600	1-4	900	tvrdé obrábanie
CrN	kov.strieborná	1900	1-7	700	ľahké kovy napr. Al, Ti
ZrN	bielo zlatá	2300	1-4	550	obrábanie Ti a Mg

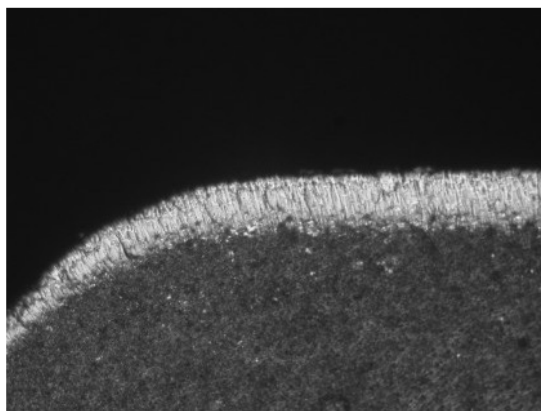
Povlak ZrN

Povlak ZrN má jasnú zlatú farbu, oproti povlaku TiN je zhruba o 30 % tvrdší, disponuje tiež lepšou chemickou a tepelnou stabilitou a vyššou medzou klzu za vyšších teplôt. Nástroje povlakované ZrN majú lepšiu trvanlivosť o 200 – 1000 % oproti

nepovlakovaným nástrojom. Povlak ZrN je vhodný na frézovanie titánu a jeho zliatin. Mechanické vlastnosti vid'. tab. 2.2. [20, 21]

Povlak TiAlN

Je to fialový povlak, ktorý patrí v súčasnosti medzi najpoužívanejšie povlaky vo výkonnom obrábaní. Povlak TiAlN je odolný voči oxidácií. Obsah hliníka v povlakoch je zhruba 50 %. Pri obsahu hliníka nad 65 % stráca povlak tvrdosť a odolnosť voči opotrebeniu. Povlak TiAlN je vhodný na obrábanie abrazívnych materiálov ako je napr. liatina, rezný nástroj nie je potrebné chladit'. Rozdiel medzi povlakom TiAlN a povlakom AlTiN je v obsahu prvkov v povlaku. Prvý prvok ma vždy väčší percentuálny obsah ako prvky na ďalších miestach. Mechanické vlastnosti vid'. tab 2.2. [20, 22]



Obr. 2.6 Povlak TiAlN po troch metroch v rezu

Povlak CrN

Povlak má striebornú až sivú farbu, medzi výhody CrN patrí vysoká stabilita na vzduchu, dobré adhézne vlastnosti, dobrá korózna odolnosť. Vďaka vysokej tvrdosti a nízkej krehkosti je možné nanášať hrubé vrstvy povlaku. Povlaky CrN našli uplatnenie pri obrábaní zliatin na báze titánu a medi. Mechanické vlastnosti povlaku vid'. tab.2.2. [20, 24]

Polykryštalický diamant

Polykryštalický diamant (PCD) sa skladá z diamantových častíc spojených navzájom spojených spekaním kovového spojiva. Diamant je v súčasnosti najtvrdší materiál a tým pádom aj najviac odoláva oteru. Ako rezný materiál má dobrú odolnosť voči oteru, avšak nedisponuje chemickou stabilitou za zvýšených teplôt a má vysokú

afinitu k železu. Nástroje z PCD sa výlučne používajú na obrábanie neželezných materiálov ako sú zliatiny hliníka s vysokým obsahom kremíka, kompozit s kovovou maticou (MMC) a plasty vystužené uhlíkovými vláknami (CFRP). S vysokým prívodom reznej kvapaliny do miesta rezu je možné PCD použiť pre veľmi jemné dokončovanie titánu. [15]

Polykrystalický kuický nitrid bóru

Polykrystalický kubický nitrid bóru skrátene (CBN), je materiál s veľmi vysokou tvrdosťou za tepla, ktorý je možné použiť pri vysokých rezných rýchlostiach. Ďalej sa CBN vyznačuje veľmi dobrou húževnatosťou a odolnosťou proti tepelný rázom. V dnešnej dobe je CBN tvorený keramickým kompozitom s obsahom 40-65 %. Keramické pojivo zvyšuje odolnosť CBN voči chemickému oteru a opotrebovaniu. Ďalšou skupinou je CBN s obsahom kovového spojiva, ktoré zvyšuje húževnatosť rezného materiálu. CBN sa používa pri dokončovaní tvrdených oceľiach s tvrdosťou nad 45 HRC, avšak tieto ocele obsahujú veľké množstvo feritu, ktorý má negatívny vplyv na odolnosť voči oteru. Nástroje vyrobené s materiálu CBN sú vhodné pre obrábanie titánu a jeho zliatin. Pri obrábaní titánu sa môže použiť CBN materiál typu KB 350 alebo KB 360. [15]

2.7.2 Geometria rezného nástroja

Pri opracovávaní titánu sa odporúča použiť menší uhol nastavenia, pre hĺbky rezu väčšie ako 5 mm sa odporúča uhol nastavenia χ_r menší ako 45° , alebo doštičky kruhového tvaru s pozitívnou geometriou čela. Geometria čela by mala byť podľa možností vždy pozitívna, s optimalizovaným zaoblením reznej hrany. Rezná hrana by mala byť špeciálne ošetrená povlakom, ktorý bráni nalepovaniu triesok pri vystúpení rezného klina zo záberu. Počet zubov, ktoré sú v priebehu frézovacieho cyklu súčasne v zábere, by mal byť čo najvyšší. Bude tak zaistená dobrá produktivita. Je doporučené používať frézy s veľmi jemným zubovým rozstupom. [5]

Tab. 2.3 Rezné podmienky a rezná geometria pri obrábaní nástrojmi so spekaného karbidu

Obrábaní materiál	Hĺbka rezu a_p [mm]	Posuv na otáčku f [mm]	Rezná rýchlosť v_c [$m \cdot min^{-1}$]	α_o [°]	γ_o [°]
Čistý titán	1,2-2,5	0,12-0,25	115-135	6-10	6
	2,5-4,0	0,25-0,40	45-67	6-10	6
	4-5	0,40-0,50	25-30	6-10	6
Zliatiny titánu	0-1	0,05-0,10	65-100	8	12-16
	1-3	0,10-0,30	50-75	8	12-16
	3-6	0,30-0,60	35-55	8	12-16

Doporučená geometria frézovacích nástrojov pre frézovanie titánových zliatin: [5]

- uhol chrbta v ortogónálnej rovine $\alpha_o = 7$ až 10° ,
- uhol čela v ortogónálnej rovine $\gamma_o = 10$ až 12° ,
- uhol sklonu fazetky hlavnej reznej hrany $\gamma_t = -10$ až -15° ,
- uhol nastavenia reznej hrany $\chi_t = 60^\circ$.

Geometria monolitných fréz

Geometria P a N [11]

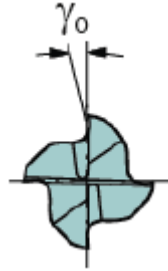
- Vhodné pre frézovanie titánu, žiaruodolných zliatin,
- Priemer jadra 50 % u geometrie P a 60 % u geometrie N,
- Pozitívny uhol čela $\gamma_o 9^\circ$ až 12° zaručí zníženie reznej sily.

Geometria L [11]

- Vhodné pre frézovanie titánu, žiaruodolných zliatin, korozivzdorných oceli,
- Priemer jadra 70 % zaručuje zvýšenú tuhosť,
- Pozitívny uhol čela $\gamma_o 4^\circ$ až 6° zaručí zníženie reznej sily.

Geometria B [11]

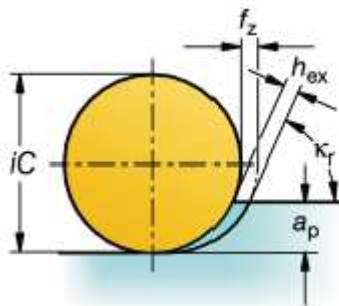
- Vhodné na hrubovanie titánu,
- Priemer jadra 60 %,
- Pozitívny uhol čela γ_0 4° až 7°.



Obr. 2.7 Geometria monolitných fréz

Frézy s kruhovými doštičkami

Pri použití fréz s kruhovými doštičkami je možné pri obmedzenej hĺbke rezu dosiahnuť najvyššiu výkonnosť ak je nastavenie χ_r menšie ako 60°. To znamená, že hĺbka rezu nesmie prekročiť ¼ priemeru VBD. U kruhových rezných doštičiek sa hrúbka triesky h_{ex} . Mení vo vzťahu k uhlu nastavenia pre daný bod rezného klina. Kruhové rezné doštičky majú lepšie predpoklady pre odoberanie väčšej maximálnej hrúbky triesky. [11]



Obr. 2.8 Schéma reznej geometrie u kruhovej doštičky [11]

2.8 Trvanlivosť

Pojem trvanlivosť rezného nástroja môžeme definovať ako súčet všetkých čistých časov rezania od začiatku obrábania až po stanovenú hodnotu opotrebovania rezného nástroja. Oprebovanie rezného klina môže nastať aj pred teoretickým časom

opotrebovania a to napr. predčasným vylomením rezného klina. Hodnota opotrebovania by mala byť nastavená na úroveň, pri ktorej nedochádza pri obrábaní k nežiaducim javom vplyvom opotrebovania nástroja. Obrábaná plocha by mala mať požadovaný tvar, drsnosť, rozmery. Nadmerné opotrebovanie nástroja je ľahko rozpoznateľné, najčastejšie sa prejavuje nepresnosťou obrábanej plochy, dobrý odchod triesky z miesta rezu nie je zaručený. Je známe že frézovanie je dynamický proces, ktorý je vyvolaný prerušovaným rezom vplyvom otáčania nástroja s určitým počtom rezných klinov a taktiež meniacou sa hrúbkou odrezávanej vrstvy. Pre frézovanie titánových zliatin je potrebné voliť nástrojový materiál, ktorý odoláva veľkému dynamickému zaťaženiu. Všeobecne je pri obrábaní titánových zliatin vyššie opotrebenie ako u oceli. Frézovanie titánových zliatin bez aplikácie reznej kvapaliny spôsobuje veľké opotrebovanie reznej hrany, použitie čistej vody je charakteristické intenzívnym oterom na chrchte a vyštiepávaním reznej hrany. Najvhodnejšie sa javí používať kvapalinu, ktorá ma mazací a zároveň chladiaci účinok zároveň. V prípade ak rezná kvapalina túto požiadavku nespĺňa sa skraca sa trvanlivosť nástroja. [5]

Vplyv reznej rýchlosti na trvanlivosť nástroja

Najvýznamnejší vplyv na trvanlivosť nástroja má teplota pri reznom procese, avšak nezanedbateľný vplyv aj vznik nárastku a vlastnosti materiálu. Obecne platí, že so stúpajúcou reznou rýchlosťou trvanlivosť rezného nástroja nerovnomerne klesá. Závislosť trvanlivosti britu na reznej rýchlosti popisuje Taylorov vzťah.

$$T = \frac{c_T}{v_c^m} \quad 2.7.1$$

kde:

c_T – konštanta [-]

v_c – rezná rýchlosť [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]

m – exponent (miera závislosti reznej rýchlosti na trvanlivosti) [-]

T – trvanlivosť [min]

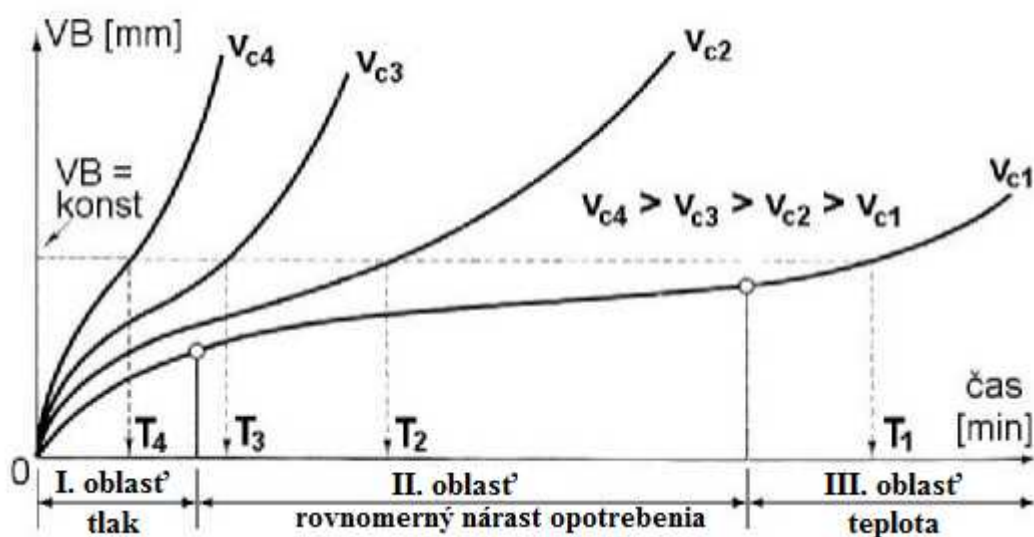
Keďže je konštanta c_T veľmi vysoká (rádovo $10^9 \div 10^{13}$), používa sa častejšie vzťah:

$$v_c = \frac{c_v}{T^{\frac{1}{m}}} \quad 2.7.2$$

Veľkosti hodnoty c_v ($10^2 \div 10^3$), konštanty sú vo vzťahu $c_v = c_T^{1/m}$

Exponent m je smernicou priamky k ose v_c .

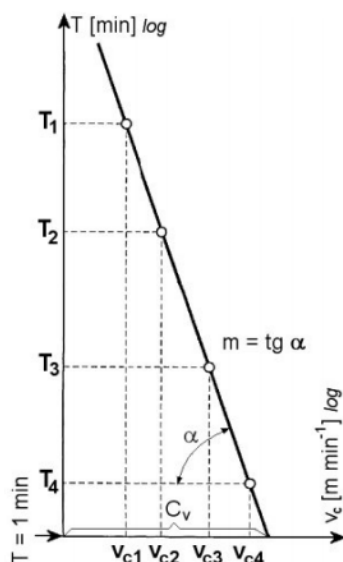
Stanovenie T - v_c vychádza z kombinácie rezný nástroj- obrábaný materiál. Táto definícia vychádza z trvanlivosti. Pri podmienke že sú všetky ostatné rezné parametre konštantné. Materiál musí byť obrábaný minimálne štyrmi rôznymi reznými rýchlosťami, pričom sledujeme nárast opotrebenia nástroja. Opotrebovanie nástroja sa následne vkladá do grafu opotrebovania. Pre lepšie zobrazenie a rozprestretie jednotlivých bodov využívame rýchlostnú radu R20 podľa ISO 3685 pre doštičky so spekaných karbidov. Pri obrábaní najvyššou reznou rýchlosťou by nemala trvanlivosť klesnúť pod 2 minúty. [25]



Obr. 2.9 Závislosť opotrebovania na čase pri rôznych rýchlostiach [25]

Pre vopred stanovenú hodnotu vybraného kritéria opotrebenia sú z časových kriviek odčítané hodnoty trvanlivosti T_1 , T_2 , T_3 a T_4 , ktoré zodpovedajú zvoleným rezným rýchlostiam v_{c1} , v_{c2} , v_{c3} , v_{c4} . Tieto body sú následne vnesené do diagramu s logaritmickými súradnicami T a v_c kde vytvorí priamku, ktorá predstavuje zvolenú mieru opotrebovania. Hodnotu c_t je možné odčítať z osy T a hodnotu c_v z osy v_c . Nevýhoda týchto vzťahov je v obmedzení nasledujúcimi podmienkami: [25]

- konštantnou šírkou záberu (a_p),
- konštantným posuvom na otáčku,
- opotrebením.

Obr. 2.10 Zlogaritmovaný graf $T-v_c$

2.9 Opatrebovanie nástroja pri frézovaní

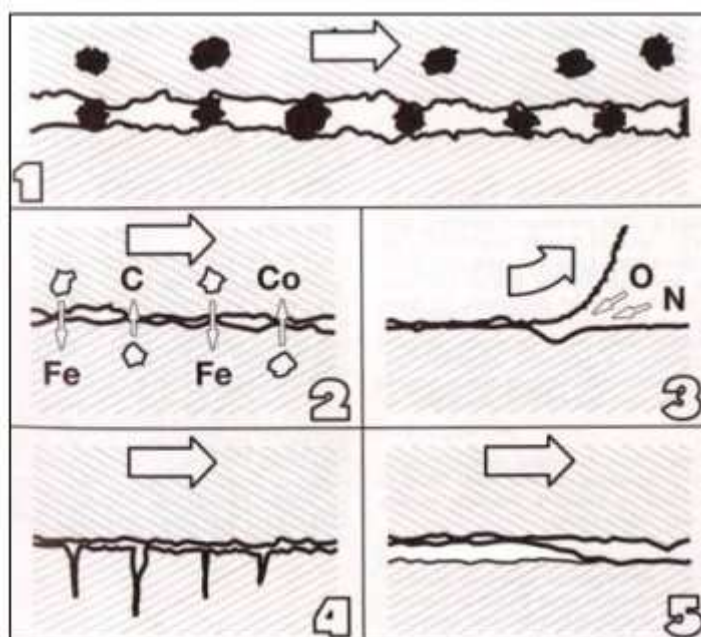
Opatrebovanie nástroja je jav, ktorý vzniká pri obrábaní, kedy sa nástroj dotýka obrábanej súčiastky. Pri obrábaní vzniká veľké množstvo tepla, ktoré namáha rezný klin nástroja. Pri frézovaní sa vytvára dynamický faktor, kedy jeden rezný klin vychádza zo záberu a ďalší rezný klin do záberu vchádza. Opatrebovanie je zložitý dej, ktorý závisí na veľkom množstve premenných. Titánové zliatiny nedosahujú veľkú tvrdosť, avšak ich pevnosť pri zvýšených teplotách a vysoká húževnatosť kladú prekážky pri ich obrábaní. Tieto vlastnosti spolu so sklonom k spevňovaniu a malou tepelnou vodivosťou vedú k veľkým mechanickým a tepelným zaťaženiám rezných nástrojov. V mieste styku rezného klina a obrobku dochádza k intenzívnemu oteru. Pri obrábaní pomocou spekaných karbidov sa javí najvhodnejšie použiť rezne nástroje na báze karbidu wolframu (WC), pri použití nástrojov na báze karbidu titanu (TiC) dochádza k intenzívnemu difúznemu opotrebovaniu. Difúzne opotrebovanie zapríčiňuje difúzia kubických zŕn TiC a TaC do obrábaného materiálu. Pri obrábaní nízkymi reznými rýchlosťami dochádza k opotrebovaniu na chrbte nástroja. Pri vyšších rezných rýchlostiach dochádza k vysokému mechanickému a tepelnému zaťaženiu, čo môže viesť v krajnom prípade k plastickej deformácii rezného klina. [5, 26, 13]

2.9.1 Mechanizmy opotrebenia nástroja

Pri obrábaní sa na čele a chrbte VBD vytvára veľké množstvo tepla, ktoré značne namáha materiál rezný klin nástroja. Pri tvorbe triesky (za vysokých tlakov, teplôt) vzniká čistý kovový povrch, ktorý má sklony k chemickým a difúznym reakciám.

Základné mechanizmy opotrebenia:

1. Abrazívne opotrebenie
2. Difúzne opotrebenie
3. Oxidačné opotrebenie
4. Lom (dynamický, statický)
5. Adhézne opotrebenie



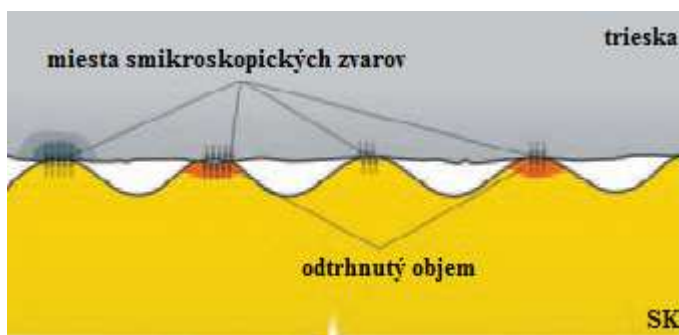
Obr. 2.11 Najčastejšie mechanizmy opotrebenia nástroja [20]

Abrazívne opotrebenie je mechanizmus opotrebenia, ktorý sa vyskytuje veľmi často, vzniká pôsobením tvrdých častíc obrábaného materiálu na rezný nástroj. Mechanizmus je podobný ako pri brúsení, tvrdé častice sa dostávajú medzi povrch obroku a nástroja. Vplyvom mechanického zaťaženia tak vzniká rovinná plocha na chrbte nástroja. Schopnosť rezného nástroja odolávať abrazívnemu oteru je daná jeho tvrdosťou. [18]

Difúzne opotrebenie vzniká pôsobením chemických vplyvov pri obrábaní. Rozhodujúca chemická vlastnosť spôsobujúca difúzne opotrebenie nástroja je afinita k obrábanému materiálu. Napríklad, použitie spekaného karbidu pri obrábaní ocele spôsobí afinitu medzi materiálmi a následný vznik žliabku na čele nástroja. Tvrdosť rezného materiálu má na tomto opotrebení len minimálny podiel. [18]

Oxidačné opotrebenie je opotrebenie, ktoré vzniká za vysokých teplôt. Vysoké teploty a prístup kyslíka do miesta rezu spôsobí oxidáciu nástrojového materiálu. Vzniknuté oxidy majú odlišné mechanické vlastnosti. Wolfram a kobalt tvorí porézny film oxidov, ktorý je nesúdržný a je odnášaný z miesta rezu vznikajúcou trieskou. [18]

Adhézne opotrebenie vzniká pri malých rezných rýchlostiach v dôsledku malej reznej rýchlosti. Adhézne opotrebovanie je spôsobené vytrvávaním jednotlivých častíc rezného klinu v dôsledku adhéznych spojov medzi nástrojom a obrábaným materiálom. Pri malých rezných rýchlostiach dochádza aj k tvorbe nárastkov, ktoré menia geometriu rezného nástroja. [18]

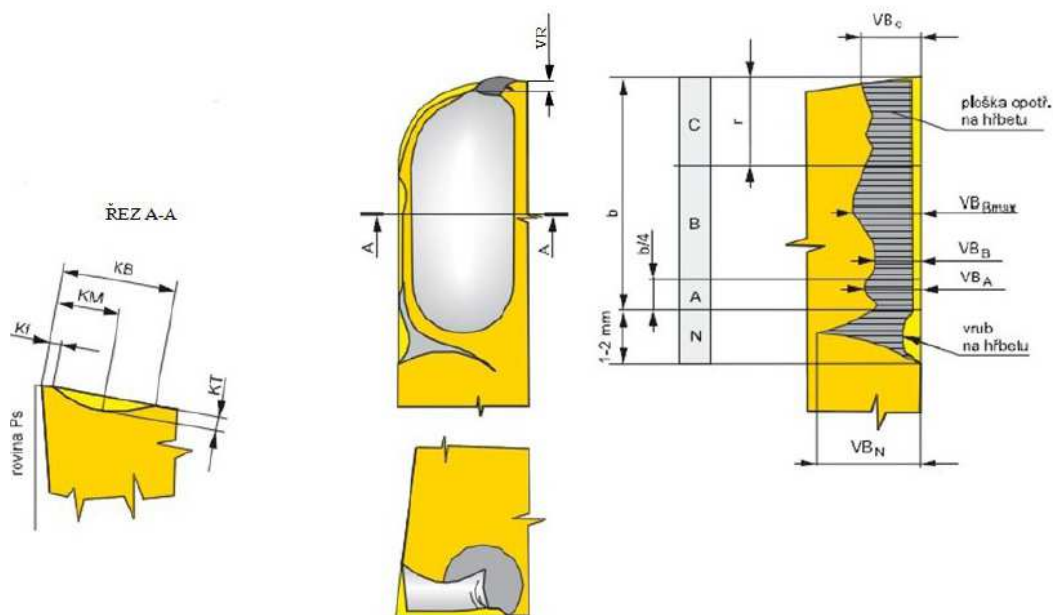


Obr. 2.12 Schematické znázornenie vzniku adhézneho opotrebenia

Lom má často termomechanické príčiny. Premenná teplota a mechanické zaťaženie môže viesť k vŕškovaniu a následne aj k lomu rezného nástroja. Rezné materiály reagujú na toto zaťaženie rozličnými spôsobmi. Čistá mechanická únava rezného materiálu s ohľadom na jeho mechanickú pevnosť môže byť vyvolaná v niektorých prípadoch vysokými reznými silami. Lom rezného nástroja môže byť zapríčinený veľkou tvrdosťou a pevnosťou obrábaného materiálu, alebo vo vysokých posunových rýchlostiach. Lom môže byť taktiež spôsobený príliš tvrdým a málo húževnatým rezným materiálom. Na druhej strane k lomu môže dôjsť aj pri použití mäkšieho a húževnatejšieho rezného materiálu, v tom prípade dôjde k lomu vplyvom vysokých teplôt a plastickej deformácie rezného klinu. [18]

2.9.2 Formy opotrebenia

Mechanické a tepelné vplyvy pri rezaní pôsobia na stav povrchu nástroja, mení sa tvar pracovných plôch nástroja, nástroj sa opotrebovávajú. Opotrebenie môže byť náhle (krehký lom, plastická deformácia) alebo postupná. Postupné opotrebovanie sa prejavuje ako nepravidelne opotrebovaná plocha, ktorá je v mieste styku s obrábaným materiálom širšia. Na čelnej ploche nástroja sa opotrebenie prejavuje vznikom žliabku. Veľkosť opotrebovania sa hodnotí šírkou opotrebovania chrbta VB alebo hĺbkou žliabku KT .



Obr. 2.13 Formy opotrebovania nástroja a ich značenie [27]

VB – opotrebenie na chrbte

VB_c – opotrebenie v oblasti špičky

VB_N – opotrebenie vo forme vrubu

VB_B – priemerne opotrebenie priamej časti ostria

VB_{Bmax} – maximálne opotrebenie

VR – radiálne opotrebenie

K_f – vzdialenosť žliabku od čela

K_M – stredná vzdialenosť žliabku

K_B – šírka žliabku

2.9.3 Klasifikácia typov opotrebenia rezného nástroja

Opotrebenie chrbta nástroja

Opotrebenie chrbta rezného klina patrí medzi abrazívne formy opotrebenia a prejavuje sa na chrbtovej ploche ostria. Tento druh opotrebovania je veľmi častý, pričom rovnomerne sa zväčšujúce opotrebovanie chrbta nástroja sa považuje za najvhodnejší typ opotrebovania. Príliš veľké opotrebenie chrbta rezného nástroja má za následok zhoršenie kvality obrobeného povrchu. Tomuto druhu opotrebovania sa nie je možné úplne vyhnúť, môžeme iba kontrolovať rýchlosť vzniku opotrebenia.

Rýchlosť opotrebovania chrbta ovplyvňuje: [28, 29]

- veľkosť reznej rýchlosti v_c ,
- veľkosť posunovej rýchlosti f_p ,
- kvalita povrchovej vrstvy VBD,
- použitie mazacej a chladiacej emulzie.



Obr. 2.14 Opotrebovanie chrbtovej plochy rezného klina [29]

Opotrebovanie v tvare žliabku na čele nástroja

Opotrebovanie vzniká v dôsledku difúzneho a abrazívneho opotrebovania. Žliabok vzniká v prvom rade difúznym opotrebovaným v mieste, kde rezný klin dosahuje najvyššiu teplotu. Najvyššia teplota vzniká v mieste, kde trieska opúšťa nástroj. Čiastočný vplyv na vznik žliabku má abrazia, ktorú spôsobujú tvrdé častice obsiahnuté v obrábanom materiáli. Pri veľkom opotrebení čela v tvare žliabku môže v niektorých prípadoch zmeniť geometriu nástroja a tým ovplyvniť tvar triesky a zmeniť pôsobenie rezných síl. Nadmerné opotrebovanie čela v tvare žliabku môže viesť až k lomu. Účinok opotrebovania sa s narastajúcou reznou rýchlosťou zvyšuje. [28, 29]



Obr. 2.15 Opatrebovanie čelnej plochy rezného klina v tvare žliabku [29]

Plastická deformácia rezného klina

Hlavnou príčinou vzniku plastickej deformácie rezného klina je tepelné a mechanické preťaženie, ktoré spôsobí zmäknutie kobaltového spojiva v spekanom karbide. Rezný materiál, ktorý odoláva tomuto opotrebeniu musí v prvom rade disponovať tvrdosťou za vysokých teplôt. Pri obrábaní pôsobí na rezný klin nástroja tlak, ktorý deformuje ostrie. Vzniknutá deformácia ešte zvýši tepelné zaťaženie, zmení pracovnú geometriu nástroja, čo spôsobí nepresnosti pri obrábaní a zmení sa odchod triesky.

Opatrebenie je možné zmenšiť správnym nastavením pracovných podmienok: [28, 29]

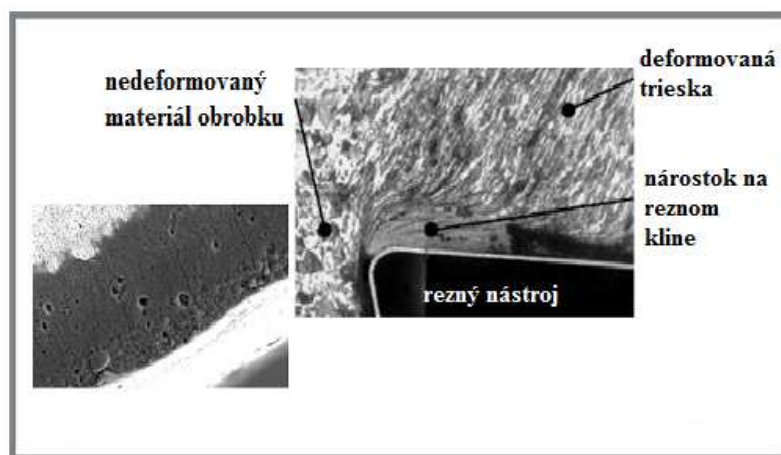
- Zníženie reznej rýchlosti v_c ,
- zníženie posunovej rýchlosti v_f ,
- voľbou vhodnej geometrie rezného nástroja.



Obr. 2.16 Plastická deformácia rezného klina [29]

Vznik nárastku

Nárastok vzniká predovšetkým vďaka adhézií materiálu. Nárastok sa tvorí hlavne tam, kde je vysoká chemická afinita, vysoká teplota a tlak. Vznik nárastku začína nalepovaním materiálu obrábaného materiálu na čelnú plochu nástroja v tenkých vrstvách a s pribúdajúcimi vrstvami sa nárastok zväčšuje. Keď sa nahromadí na špičke nástroja veľké množstvo materiálu môže to viesť k zmene geometrie nástroja. V prípade odlomenia nárastku môže prísť k poškodeniu rezného klina. V niektorých prípadoch sa stáva, že oddelené kusy nárastu sa nalepia na povrch obrobku. [13, 30]



Obr. 2.17 Nárastok na reznom klíne [13]

K prilepovaniu triesky na čelo nástroja v najväčšej miere prispievajú dva faktory. V prvom rade sú to vysoké teploty a tlaky v okolí rezu. Druhým dôležitým faktorom pre vznik nárastku je mála rezná rýchlosť, ktorá spôsobí pomalý odvod triesky po čelnej ploche nástroja. Vplyvom malej rýchlosti pohybu triesky po čelnej ploche a vysokých teplôt a tlakov vzniká priaznivé prostredie na vznik nárastkov.

Riziko vzniku nárastku môžeme znížiť: [13, 28, 30]

- použitím vhodnejšej ostrej geometrii rezného klina,
- hladšou čelnou plochou rezného nástroja,
- zvýšením reznej rýchlosti,
- zmenou povlaku rezného nástroja.



Obr. 2.18 Nárastok [29]

3 Experimentálna časť

3.1 Popis experimentálnej časti

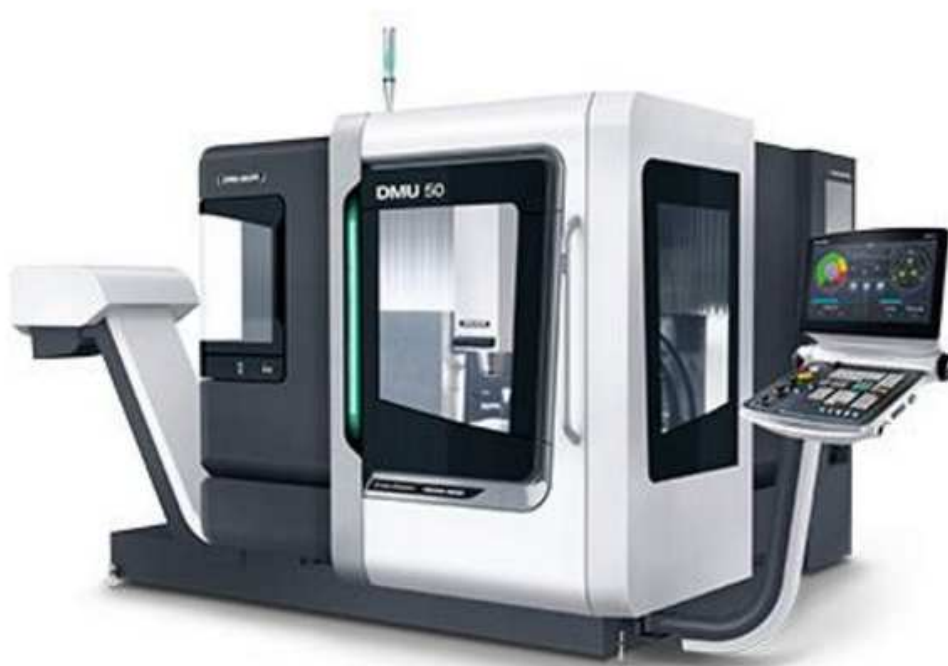
Cieľom experimentálnej činnosti je zistenie a nameranie trvanlivosti reznej hrany vymeniteľných rezných doštičiek pri obrábaní titánovej zliatiny UNS R56 260. Rezné doštičky majú označenie RHKW 1003MOTN IN2035 od firmy Ingersoll. Skúška trvanlivosti povlakovaných vymeniteľných rezných doštičiek bude realizovaná čelným frézovaním materiálu s jednou reznou hranou podľa ISO 3685 za vopred overených rezných podmienkach. Z priebehu opotrebovania VBD a vykreslenej grafickej závislosti na uplynutom čase bude stanovená trvanlivosť rezného nástroja a vyhodnotený priebeh obrábania.

3.2 Obrábací stroj

Pri stanovovaní trvanlivosti rezného nástroja bolo využité päť ose frézovacie centrum **DMU 50** od firmy DMG MORI. Fréza disponuje riadiacim systémom od firmy Heidenhain TNC 530 HSCI s post procesorom. Stroj má vo vlastníctve VŠB- TU Ostrava a je umiestnený na pracovisku katedry 346 v budove CPIT.

Tab. 3.1 Vybrane parametre stroja DMU 50 [31]

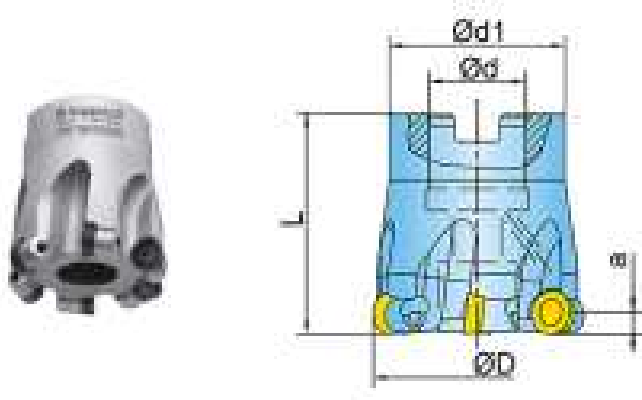
Parametre DMU 50	
Funkcia	Technické parametre
Rozsah pohybu v osách X/Y/Z [mm]	500/450/400
Otáčky [min ⁻¹]	20-18 000
Rychloposun v osách X/Y/Z [m·min ⁻¹]	30
Maximálna prítláčna sila X/Y/Z [kN]	4,8
Výkon vretena [kW]	35
Točivý moment vretena [N·m]	130
Rozmer otočného stola [mm]	600x500
Maximálne zaťaženie stola [Kg]	300
Počet nástrojov [-]	16
Hmotnosť stroja [Kg]	4 480



Obr. 3.1 CNC frézovacie centrum DMU 50 [31]

3.3 Obrábací nástroj

Pri zisťovaní trvanlivosti VBD bola využitá frézovacia hlavička **5W7G052R00** s vymeniteľnými reznými doštičkami od firmy Ingersoll Cutting Tools. Táto fréza sa môže používať na čelné a tvarové frézovanie s použitím vysokej rýchlosti posuvu, fréza sa taktiež dá použiť na frézovanie drážok. Rezné sily smerujú k vretenu, čo umožňuje stabilitu obrábacieho procesu, taktiež sa znižujú vibrácie a bočné sily ktoré zapríčínajú priehyb nástroja.



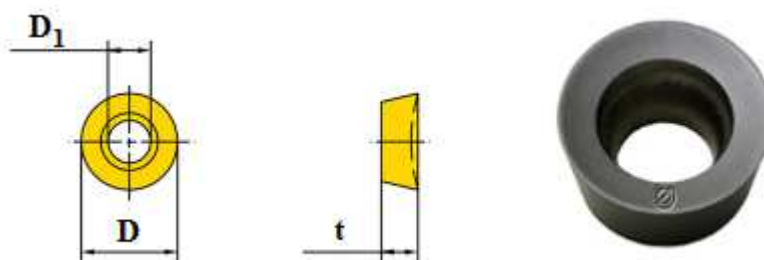
Obr. 3.2 Fréza 5W7G052R00 od firmy Ingeresoll Cutting Tools [32]

Tab. 3.2 Parametre frézy 5W7G052R00 od firmy Ingersoll Cutting Tools [32]

Priemer D [mm]	Priemer d [mm]	Priemer d ₁ [mm]	Dĺžka L [mm]	Počet zubov [-]
52	22	40	50	6

3.3.1 Vymeniteľné rezné doštičky

Pri experimente boli použité vymeniteľné rezné doštičky **RHKW 1003MOTN IN2035** od firmy Ingersoll Cutting Tools. Rezná doštička je opatrená vrchným povlakom TiAlN, ktorý zaručuje pri obrábaní titánu reznú rýchlosť do $60 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Doštička má neutrálnu geometriu, ktorá je vhodná na hrubovacie operácie. Rezná doštička je podľa ISO 513 vhodná obrábať tieto skupiny materiálov H/S/N.



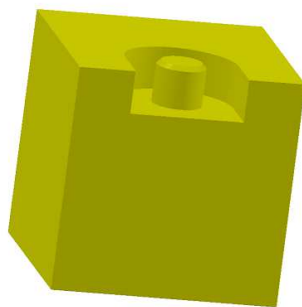
Obr. 3.3 RHKW 1003MOTN IN2035 od firmy Ingersoll Cutting Tools [33]

Tab. 3.3 Vlastnosti RHKW 1003MOTN IN2035 od firmy Ingersoll Cutting Tools [33]

Hrúbka t [mm]	Priemer D ₁ [mm]	Priemer D [mm]	Geometria	Doporučený posuv na zub f _z [mm]
3,8	4,4	10	N	0,25-0,60

3.3.1.1 Prípravok na meranie opotrebenia VBD

Na uľahčenie merania opotrebovania vymeniteľnej reznej doštičky bol použitý prípravok vytlačený na plastovej 3D tlačiarňi. Prípravok uľahčí polohovanie VBD voči kamere mikroskopu a zabezpečí konštantnú vzdialenosť pri meraní opotrebenia na čele a chrbte vymeniteľnej reznej doštičky.

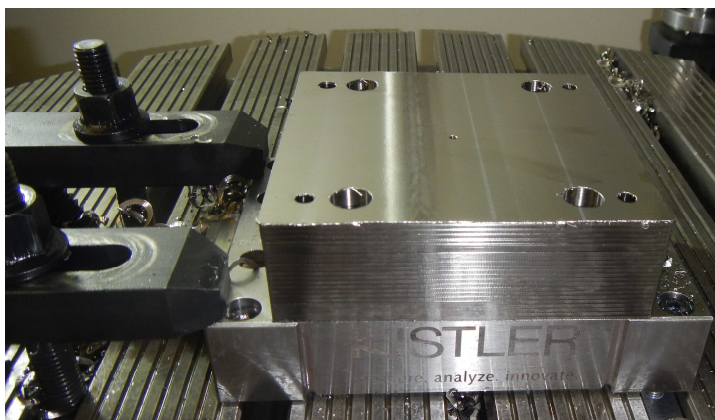


Obr. 3.4 Prípravok na meranie opotrebenia VBD

3.4 Obrábaný materiál

Titánová zliatina UNS R56260 dobre odoláva vysokým teplotám, má nízku tepelnú rozťažnosť, nízku hustotu, vysokú pevnosť, je nemagnetická a má dobré vlastnosti pri zvýšených teplotách. Používa sa v konštrukčných riešeniach, kde je potrebná vysoká pevnosť, nízka hmotnosť a vysoká odolnosť voči korózií. Vyrábajú sa z nej komponenty pre letecký priemysel a tiež sa používa v ropnom a plynovom priemysle. Chemické zloženie je uvedené v tabuľke 1.1 a mechanické vlastnosti vid' tabuľka 1.2.

Obrábaný materiál bol upevnený pomocou skrutiek na dynamometer, ktorý bol k lôžku stroja upevnený pomocou dvoch svoriek na jednej strane a dvoch na opačnej strane vid' obr. 3.5. Polotovár obrobku mal rozmery 120x120x40 mm.



Obr. 3.5 Upevnenie obrobku k lôžku obrábacieho stroja DMU 50

3.5 Návrh a realizácia skúšky

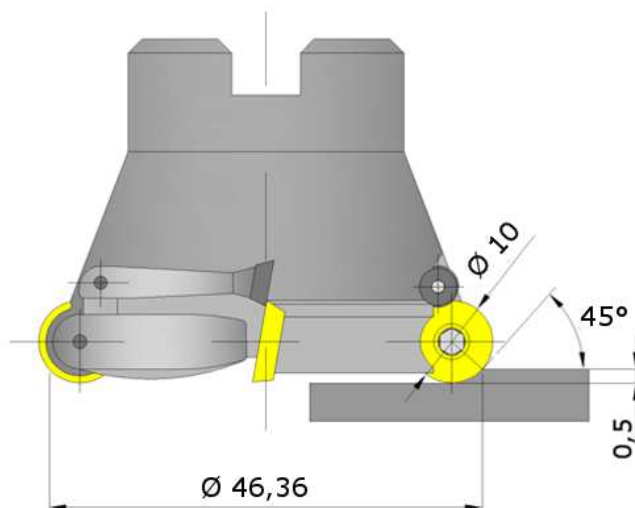
Pre skúšku trvanlivosti boli navrhnuté tieto vstupné parametre a rezné podmienky súbežného a nesúbežného frézovania vid'. tab. 3.4. Ako obrábaný materiál bol pre skúšku zvolený materiál UNS R56 260. Pre frézovanie bola zvolená technológia suchého obrábania, pri ktorej obrábací proces prebieha v prirodzenom prostredí. Pracovné prostredie je tvorené vzduchom a najčastejšie sa aplikuje spoločne s HSC alebo HFC obrábaním.

Tab. 3.4 Rezné podmienky pri čelnom frézovaní titánovej zliatiny

Obrábaný materiál	Rezná rýchlosť v_c [m·min ⁻¹]	Posuv na zub f_z [mm]	Otáčky n [min ⁻¹]	Rýchlosť posuvu v_f [m·min ⁻¹]
Titánová zliatina UNS R56260	50	0,25	343	0,086
		0,4		0,137
		0,6		0,205
	80	0,25	550	0,137
		0,4		0,219
		0,6		0,329
	100	0,25	686	0,171
		0,4		0,274
		0,6		0,411
	130	0,25	893	0,223
		0,4		0,357
		0,6		0,536

3.5.1 Príklad teoretického výpočtu

Teoretický výpočet rýchlosti posuvu pre frézovanie titánovej zliatiny UNS R56260 šesť hrotou frézou 5W7G052R00, ktorá ma priemer frézy $D_1 = 52$ mm. Pre výpočet rýchlosti posuvu musíme pracovať s efektívnym priemerom frézy, ktorý bol určený z obrázku 3.6. Fréza bola osadená jednou reznou doštičkou typu RHKW 1003MOTN IN2035, rezné podmienky boli navrhnuté podľa výrobcu.



Obr. 3.6 Náčrt výpočtu efektívneho priemeru (Def.)

Pre názorný príklad výpočtu boli vybrané tieto rezné podmienky: $f_z = 0,25 \text{ mm}$, $v_c = 50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $D_{\text{ef.}} = 46,36 \text{ mm}$. Teoretický výpočet rýchlosti posuvu v_f pre frézovanie titánovej zliatiny UNS R56260, frézou o efektívnom priemere a reznej rýchlosti $v_c = 50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

$$v_f = f_n \cdot n = f_z \cdot z \cdot n [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}] \quad 3.5.2$$

$$v_f = 0,25 \cdot 1 \cdot 343$$

$$v_f = 85,7 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \Rightarrow 0,086 [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$$

kde: v_f – posuvová rýchlosť [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]

z – počet zubov frézy

n – otáčky [min^{-1}]

f_z – pusuv na zub [mm]

Teoretický výpočet otáčok pre frézovanie titánovej zliatiny UNS R56 260, frézou o efektívnom priemere $D_{ef} = 46,36$ mm a reznej rýchlosti $v_c = 50$ m·min⁻¹.

$$v_c = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{1000} \quad [m \cdot min^{-1}] \quad 3.5.2$$

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D_1}$$

$$n = \frac{50 \cdot 1000}{\pi \cdot 46,36}$$

$$n = 343 \quad [min^{-1}]$$

kde: v_c – rezná rýchlosť [m·min⁻¹]

D_1 – efektívny priemer frézy [mm]

n – otáčky [min⁻¹]

Teoretický výpočet odobraného materiálu pri frézovaní titánovej zliatiny UNS R56260.

$$Q = \frac{a_p \cdot a_e \cdot v_f}{1000} \cdot t_{AS} \quad [cm^3] \quad 3.5.3$$

kde: Q - objem odobraného materiálu [cm³]

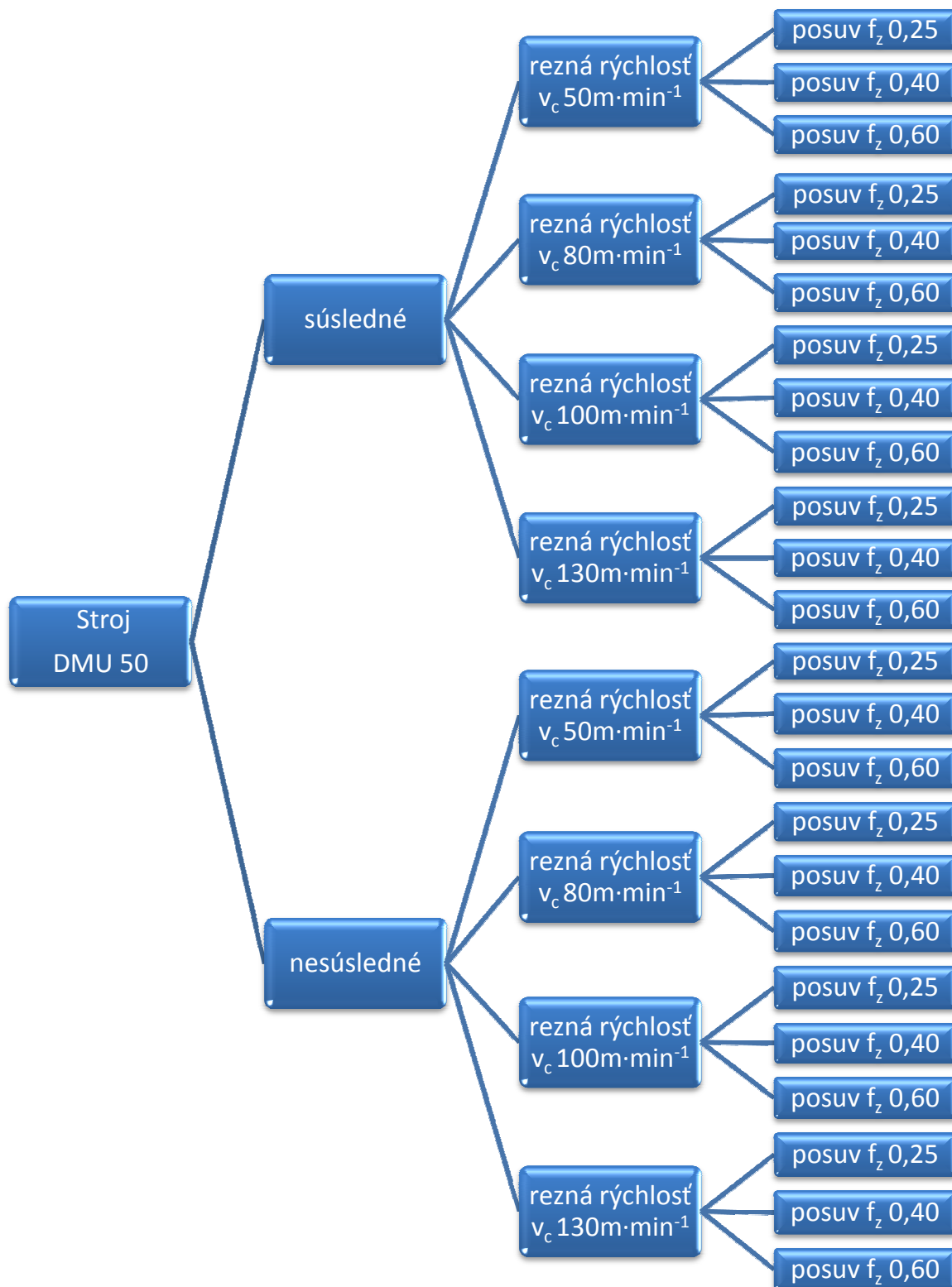
v_c - rezná rýchlosť [m·min⁻¹]

a_p - hĺbka rezu [mm]

f - posuv [mm]

t_i - čas do dosiahnutia zvolenej hodnoty VB_{Bmax} [min]

Schéma postupu realizácie skúšky trvanlivosti:



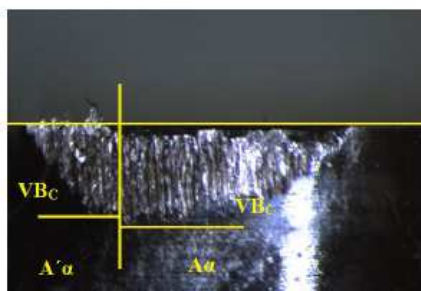
Obr. 3.7 Schéma postupu merania trvanlivosti v závislosti na parametroch frézovania

3.6 Meranie trvanlivosti pri frézovaní titánovej zliatiny UNS R56260

Experimentálne stanovenie trvanlivosti rezného nástroja bolo rozdelené do dvoch kategórií a to súbežne a nesúbežne frézovanie. Stratégia frézovania by mala mať na trvanlivosť významný vplyv. Postup merania trvanlivosti rezného nástroja bol podľa schémy vid'. obr. 3.7. V záujme šetrenia obrábaného materiálu, času, bude fréza osadená iba jednou vymeniteľnou platničkou a dĺžka záberu činila 120 mm, čas jednotlivých prejazdov sa líši v závislosti na reznej rýchlosti a posuvu na zub nástroja avšak objem odobraného materiálu bol po každom prejazde rovnaký. Pre meranie opotrebovania bola použitá priama mikroskopická metóda merania. Veľkosť opotrebovania bola určená priamym meraním lineárnych rozmerov vid'. obr.3.9. Ako kritérium opotrebovania bola stanovená hodnota $VB_{max} = 0,3$ mm, toto kritérium bolo zvolené v snahe znížiť ekonomické náklady a čas experimentu. Meranie bolo vykonávané vždy po dvoch prejazdoch, fréza bola v zábere na 60 % . Z dôvodu veľkého množstva dát boli do tabuliek opotrebovania vkladané fotografie opotrebovania po druhom a poslednom prejazde. Pre každú hodnotu opotrebovania VBD bol spočítaný objem dosiahnutého odobraného materiálu.



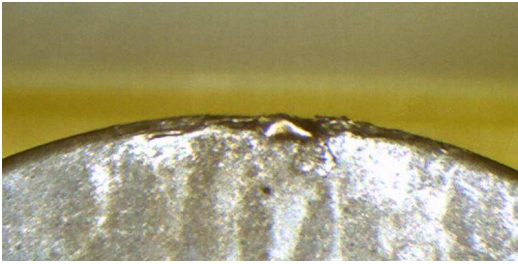

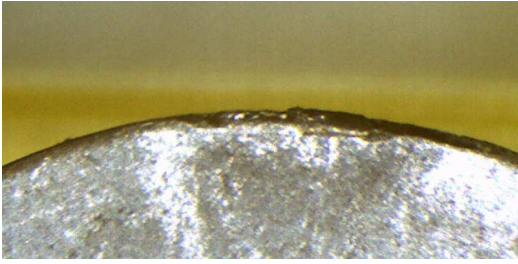
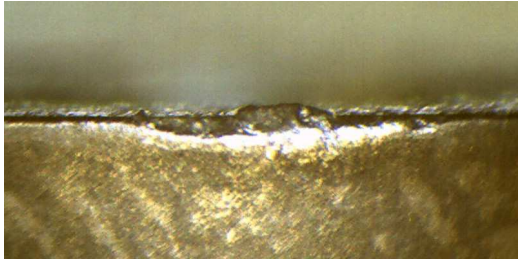
Obr. 3.8 Laboratórna zostava pre meranie opotrebovania nástrojov



Obr. 3.9 Meranie opotrebovania na chrabte nástroja

Spracovanie výsledkov pre nesúbežné frézovanie pri reznej rýchlosti $v_c = 50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

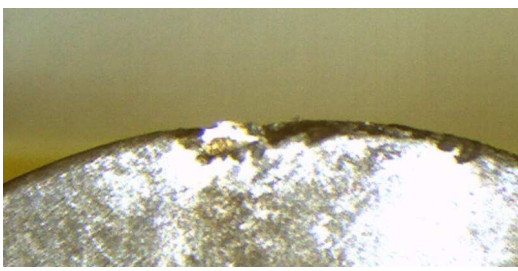

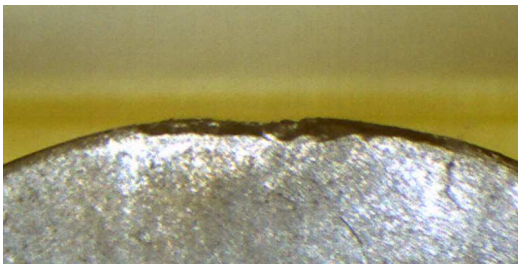
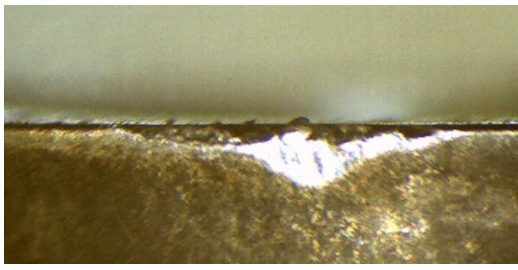
Tab. 3.5 Priebeh opotrebovania nástroja pri nesúbežnom frézovaní ($v_c = 50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$)

Rezné parametre: rezná rýchlosť $v_c = 50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ posuv na zub $f_z = 0,25 \text{ mm}$				
Plocha čela A_γ			Plocha chrbta A_α	
prejazd	t_{As} [min]	Q [cm ³]	Hlavný chrbát - A_α VB _{Bmax} [mm]	Hlavný chrbát - A_α VB _c [mm]
i=2	3	4	0,24	0,10
				
i=4	6	8	0,25	0,13
i=6	9	12	0,26	0,14
i=8	12	16	0,34	0,18
				

V tabuľke 3.5 je zdokumentovaný priebeh opotrebovania chrbta a čela ostria VBD zo spekaného karbidu pri nesúbežnom čelnom frézovaní, pri použití reznej rýchlosti $v_c = 50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a posuvu na zub $f_z = 0,25 \text{ mm}$. Zrovnanie objemu odobratého materiálu s ostatnými reznými podmienkami je v tabuľke 3.19. Z tabuľky 3.5 vyplýva, že po ôsmom prejazde bola prekročená kritická hodnota opotrebovania na chrbte $VB_{krit.}$, konečná nameraná hodnota VB_{max} bola $0,34 \text{ mm}$. Pri obrábaní dochádzalo

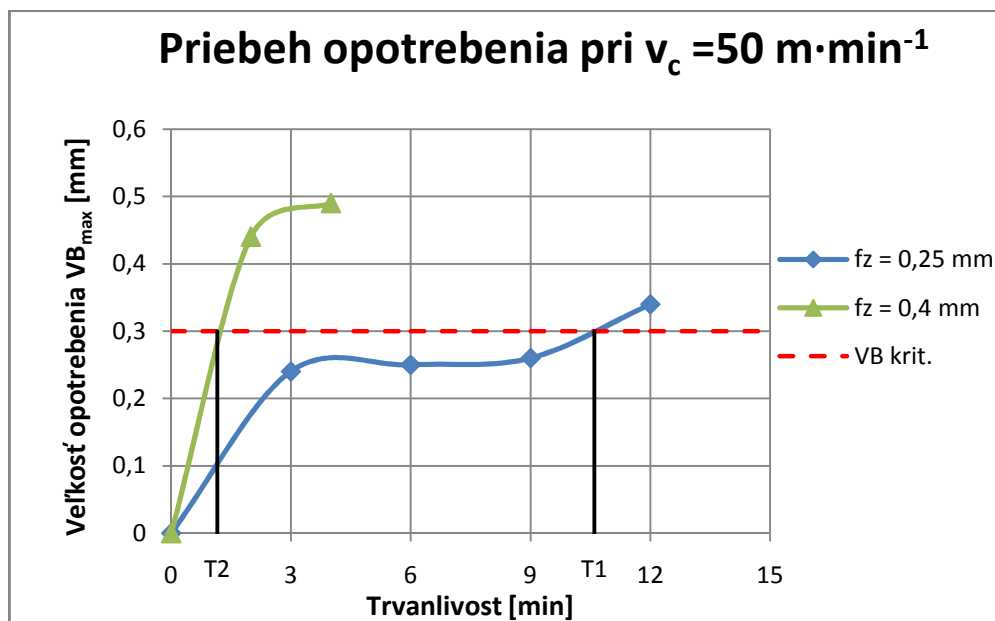
k nalepovaniu triesky na chrbát nástroja, čo zapríčinilo vznik nárastku v priebehu obrábania. Opotrebovanie čela bolo minimálne a dal sa dobre odhadnúť jeho nasledujúci vývoj.

Tab. 3.6 Priebeh opotrebovania nástroja pri nesúbežnom frézovaní ($v_c = 50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$)

Rezné parametre: rezná rýchlosť $v_c = 50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ posuv na zub $f_z = 0,40 \text{ mm}$				
Plocha čela A_γ			Plocha chrbta A_α	
prejazd	t_{As} [min]	Q [cm ³]	Hlavný chrbát - A_α VB _{Bmax} [mm]	Hlavný chrbát - A_α VB _c [mm]
i=2	2	4	0,44	0,21
				
i=4	4	8	0,49	0,24
				

V tabuľke 3.6 je zdokumentovaný priebeh opotrebenia chrbta a čela ostria VBD pri nesúbežnom čelnom frézovaní pri použití reznej rýchlosti $v_c = 50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a posuvu na zub $f_z = 0,40 \text{ mm}$. Z tabuľky 3.6 vyplýva, že už po druhom prejazde bola prekročená kritická hodnota opotrebenia na chrbte $VB_{krit.}$, konečná nameraná hodnota VB_{max} bola 0,49 mm. Pri obrábaní vznikalo značné opotrebenie, ktoré bolo s predchádzajúcou skúškou mnohonásobne intenzívnejšie. Z tohto dôvodu a urýchlenia experimentu a predpokladu rýchleho opotrebenia alebo lomu sa meranie trvanlivosti pri posuve $f_z = 0,60 \text{ mm}$ nevykonalo.

Na základe merania opotrebenia rezného klina bola vytvorená závislosť na čase T - v_c túto závislosť je možné vidieť v grafe 3.1. Z grafu vyplýva, že priebeh opotrebenia VBD pri posuve $f_z = 0,25$ mm má parametre správneho postupu opotrebovania ako uvádza literatúra. Na začiatku sa rezný klin opotrebováva rýchlo, v druhej fáze opotrebenie narastá pozvoľne až do momentu kedy nastane tretia fáza. V tretej fáze nastane zrýchlene opotrebenie nástroja, po prekročení hodnoty kritického opotrebenia nastáva strata možnosti ďalšieho obrábania.

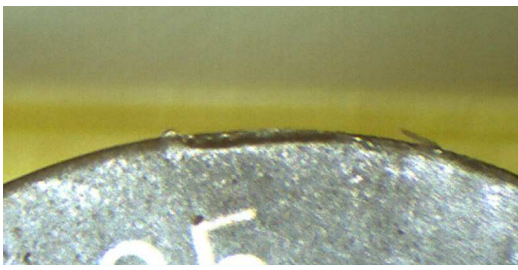
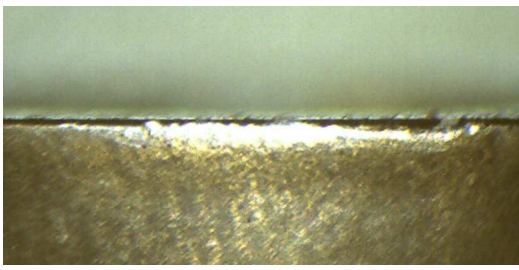
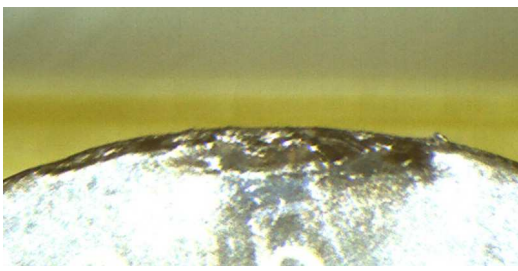



Graf. 3.1 Priebeh opotrebenia nástroja pri rôznych posuvoch

Z grafu 3.1 bola určená trvanlivosť nástroja pri dosiahnutí zvoleného kritického opotrebenia na chrbte nástroja $V_{B_{krit.}}$. Následne boli pre jednotlivé rezné podmienky, na základe trvanlivosti podľa vzorca 3.5.3 vypočítané objemy odobraného materiálu. Hodnoty trvanlivosti sú uvedené v tabuľke 3.19 a porovnané s ostatnými výsledkami trvanlivosti v grafe 3.8, objemy odobraného materiálu sú v tabuľke 3.19. a porovnanie s ostatnými hodnotami je v grafe 3.7.

Spracovanie výsledkov pre nesúbežné frézovanie pri reznej rýchlosti $v_c = 80 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

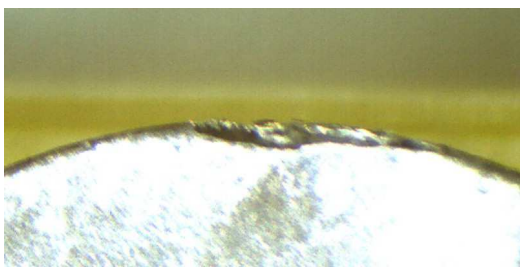
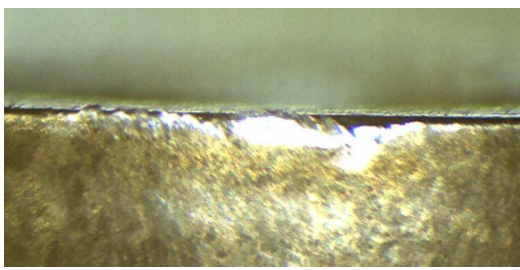
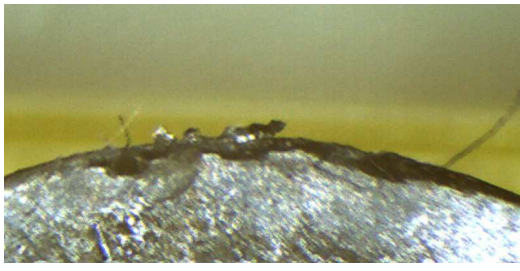
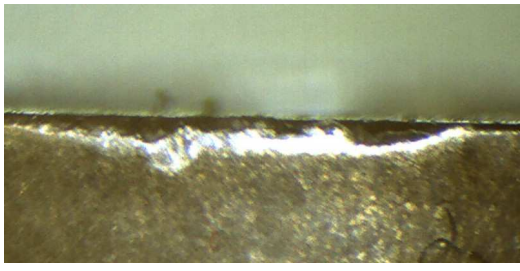
Tab. 3.7 Priebeh opotrebovania nástroja pri nesúbežnom frézovaní ($v_c = 80 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$)

Rezné parametre: rezná rýchlosť $v_c = 80 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ posuv na zub $f_z = 0,25 \text{ mm}$				
Plocha čela A_γ			Plocha chrbta A_α	
prejazd	t_{As} [min]	Q [cm ³]	Hlavný chrbát - A_α VB _{Bmax} [mm]	Hlavný chrbát - A_α VB _c [mm]
i=2	2	4	0,24	0,12
				
i=4	4	8	0,25	0,13
i=6	6	12	0,27	0,14
i=8	8	16	0,33	0,17
i=10	10	20	0,48	0,25
				

V tabuľke 3.7 je zdokumentovaný priebeh opotrebovania chrbta a čela ostria VBD zo spekaného karbidu pri nesúbežnom čelnom frézovaní, pri použití reznej rýchlosti $v_c = 50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a posuvu na zub $f_z = 0,25 \text{ mm}$. Pri prvých minútach v zábere sa hodnota opotrebovania pohybovala v prijateľných hodnotách, nedochádzalo k výraznému opotrebovaniu čela ani chrbta VBD. Po deviatej minúte v zábere doštička vykazovala

známky vysokého tepelného zaťaženia (sčernenie v okolí opotrebovanej oblasti). Kritická hodnota opotrebovania na chrbte $VB_{krit.}$ bola prekročená po ôsmom prejazde, konečná nameraná hodnota VB_{max} bola 0,34 mm.

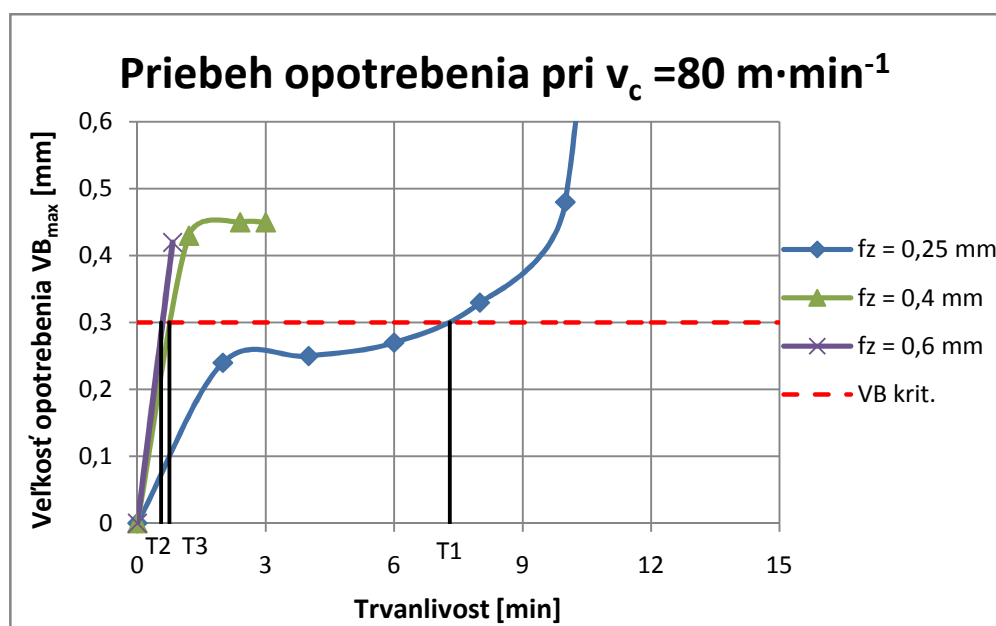
Tab. 3.8 Priebeh opotrebovania nástroja pri nesúbežnom frézovaní ($v_c = 80 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$)

Rezné parametre: rezná rýchlosť $v_c = 80 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ posuv na zub $f_z = 0,40 \text{ mm}$				
Plocha čela A_γ			Plocha chrbta A_α	
prejazd	t_{As} [min]	Q [cm ³]	Hlavný chrbát - A_α VB_{Bmax} [mm]	Hlavný chrbát - A_α VB_c [mm]
i=2	1,2	4	0,43	0,17
				
i=4	2,4	8	0,45	0,20
i=5	3	10	0,45	0,22
				

V tabuľke 3.8 je zdokumentovaný priebeh opotrebenia chrbta a čela ostria VBD pri nesúbežnom čelnom frézovaní pri použití reznej rýchlosti $v_c = 80 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a posuvu na zub $f_z = 0,4 \text{ mm}$. Z tabuľky 3.8 vyplýva že už po prvom prejazde bola prekročená kritická hodnota opotrebovania na chrbte $VB_{krit.}$, konečná nameraná hodnota VB_{max} bola 0,45 mm. K nalepovaniu obrábaného materiálu dochádzalo hlavne v počiatočných prejazdoch, nárastok ovplyvňoval proces rezania vo veľmi malej miere. Pri frézovaní s posuvom $f_z = 0,6 \text{ mm}$ bolo už po prvom meraní zaznamenané

opotrebenie chrpta $VB_{Bmax.} = 0,42$ mm, s tohto dôvodu sa v obrábaní ďalej nepokračovalo.

Na základe merania opotrebenia rezného klina bola vytvorená závislosť na čase $T-v_c$ túto závislosť je možné vidieť v grafe 3.2. Z grafu vyplýva, že priebeh opotrebenia VBD pri posuve $f_z = 0,25$ mm sa javí ako najvhodnejšie pri danej rýchlosti, zostávajúce dva posuvy sú pri danej rýchlosti nepoužiteľné. Na začiatku záberu opotrebovanie narastá pomerne intenzívne, v druhej fáze opotrebenie narastá až do momentu začatia tretej fázy pomaly. V tretej fáze nastane zrýchlene opotrebovanie nástroja a strata možnosti ďalšieho obrábania.

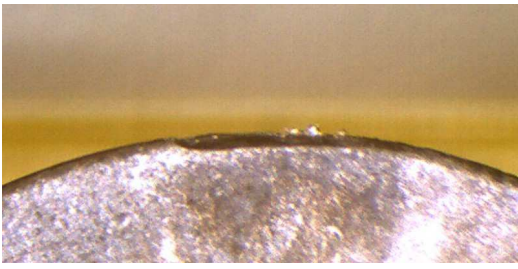
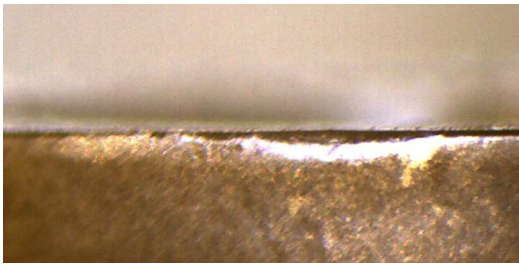
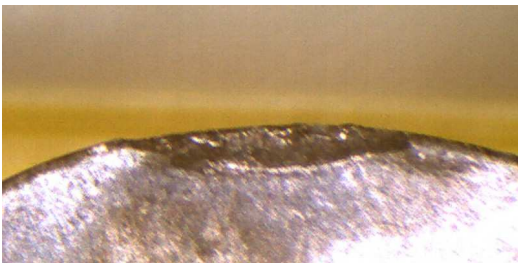
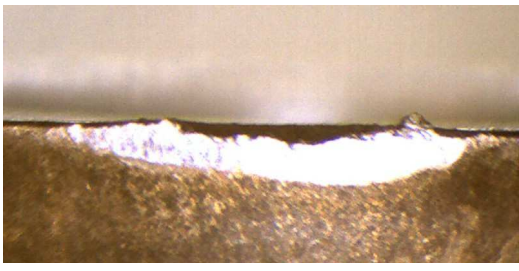


Graf. 3.2 Priebeh opotrebenia pri reznej rýchlosti $v_c=80m\cdot min^{-1}$

Z grafu 3.2 bola určená trvanlivosť nástroja pri dosiahnutí zvoleného kritického opotrebenia na chrpte nástroja $VB_{krit.}$. Pre jednotlivé rezné podmienky, na základe trvanlivosti bol podľa vzorca 3.5.3 vypočítaný objem odobraného materiálu. Hodnoty trvanlivosti sú uvedené v tabuľke 3.19 a porovnané s ostatnými výsledkami trvanlivosti v grafe 3.8, objemy odobraného materiálu sú v tabuľke 3.19. a porovnanie s ostatnými hodnotami je v grafe 3.7.

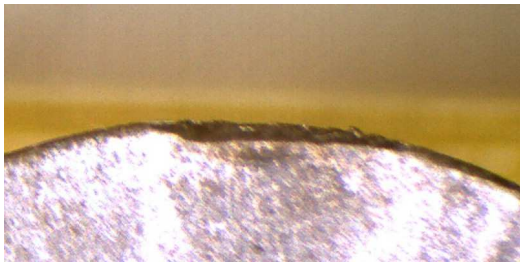
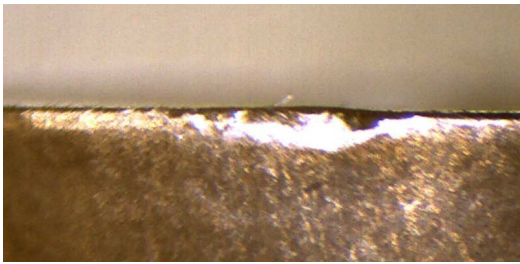
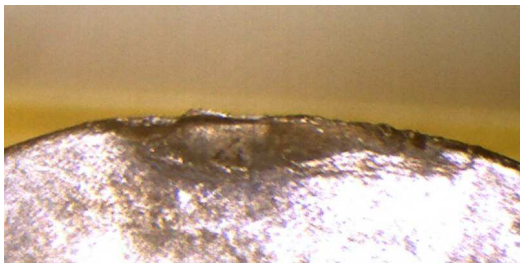
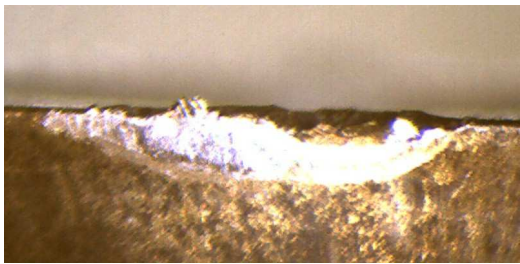
Spracovanie výsledkov pre nesúbežné frézovanie pri reznej rýchlosti $v_c = 100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

Tab. 3.9 Priebeh opotrebovania nástroja pri nesúbežnom frézovaní ($v_c = 100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$)

Rezné parametre: rezná rýchlosť $v_c = 100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ posuv na zub $f_z = 0,25 \text{ mm}$				
Plocha čela A_γ			Plocha chrbta A_α	
prejazd	t_{As} [min]	Q [cm ³]	Hlavný chrbát $-A_\alpha$ VB_{Bmax} [mm]	Hlavný chrbát $-A_\alpha$ VB_c [mm]
i=2	1,33	4	0,26	0,13
				
i=4	2,66	8	0,43	0,14
				

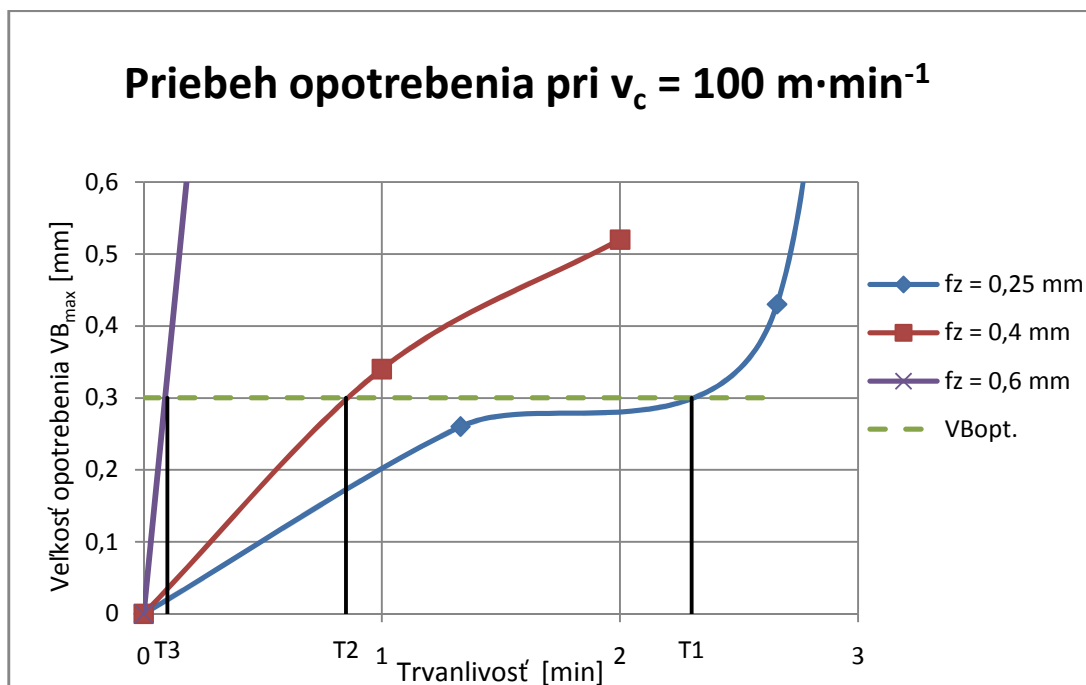
V Tab. 3.9 je zdokumentovaný priebeh opotrebovania chrbta a čela rezného klina pri nesúbežnom čelnom frézovaní pri použití reznej rýchlosti $v_c = 100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a posuvu na zub $f_z = 0,25 \text{ mm}$. Z tabuľky 3.9 vyplýva, že po druhom prejazde bola takmer dosiahnutá optimálna hodnota opotrebovania na chrbte $VB_{krit.}$, výsledná nameraná hodnota po štvrtom prejazde bola $VB_{max} = 0,54 \text{ mm}$. Vymeniteľná rezná doštička javila po dvoch minútach v zábere poškodenie vplyvom vysokých teplôt (sčernenie v okolí rezu). Na chrbte VBD bolo zaznamenané počiatočne štádium vzniku nárustku, vznik nárustku pravdepodobne zapríčinili vysoké tlaky a teploty. Po spustení ďalšieho prejazdu nastal lom VBD.

Tab. 3.10 Priebeh opotrebovania nástroja pri nesúbežnom frézovaní ($v_c = 100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$)

Rezné parametre: rezná rýchlosť $v_c = 100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ posuv na zub $f_z = 0,40 \text{ mm}$				
Plocha čela A_γ			Plocha chrbta A_α	
prejazd	$t_{As}[\text{min}]$	$Q [\text{cm}^3]$	Hlavný chrbát - A_α $VB_{Bmax} [\text{mm}]$	Hlavný chrbát A_α $VB_c [\text{mm}]$
i=2	1	4	0,34	0,18
				
i=4	2	8	0,52	0,26
				

V tabuľke 3.10 je zdokumentovaný priebeh opotrebovania chrbta a čela ostria VBD pri nesúbežnom čelnom frézovaní pri použití rezných rýchlostí $v_c = 100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a posuvu na zub $f_z = 0,4 \text{ mm}$. Z tabuľky 3.10 vyplýva, že už po prvom prejazde bola prekročená kritická hodnota opotrebovania na chrbte $VB_{krit.}$, konečná nameraná hodnota VB_{max} bola $0,45 \text{ mm}$. Na čele VBD môžeme pozorovať vysoké tepelné zaťaženie, ktoré výrazným spôsobom urýchlilo opotrebovanie. Od druhého prejazdu bol zaznamenaný vznik nárastku, a s tým spojená zmena geometrie rezného klina. Zrovnanie objemu odobratého materiálu s ostatnými reznými podmienkami je v grafe 3.7. Pri frézovaní s posuvom $f_z = 0,6 \text{ mm}$ bolo už po prvom meraní zaznamenané opotrebovanie chrbta $VB_{max} = 0,42 \text{ mm}$.

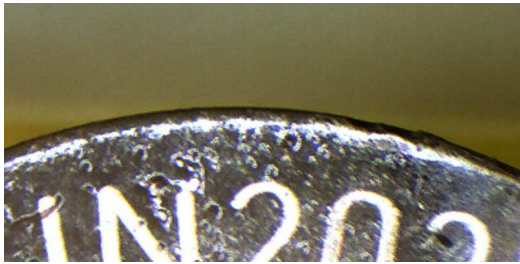
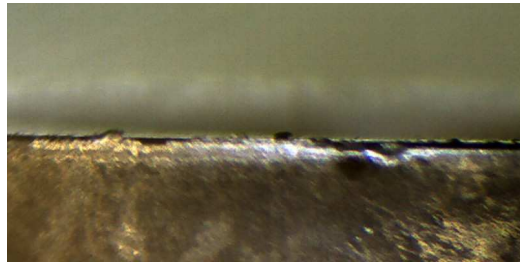
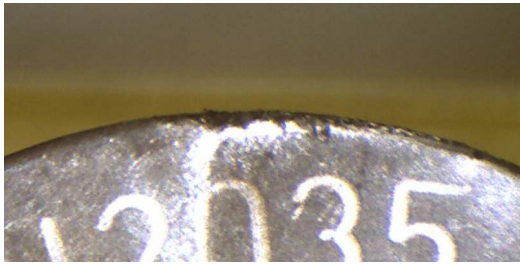
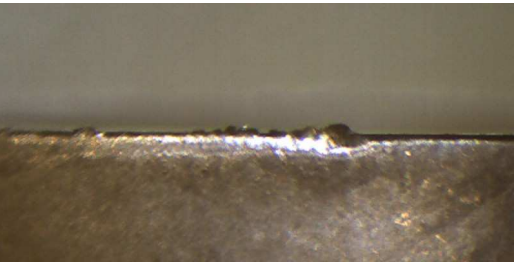
Na základe merania opotrebenia rezného klina bola vytvorená závislosť na čase T - v_c , túto závislosť je možné vidieť v grafe 3.3. Z grafu 3.3 vyplýva, že pri použitej reznej rýchlosti $v_c = 100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ sa ako najvhodnejší javí posuv $f_z = 0,25 \text{ mm}$. Po začatí obrábania opotrebenie pomaly lineárne narastá, po dosiahnutí času $T = 1,5 \text{ min}$ sa opotrebenie spomalí a drží sa na hodnote $VB_{\max} = 0,28 \text{ mm}$. Po uplynutí času $T = 2,3 \text{ min}$ nastáva rapídne zvýšenie opotrebenia, ktoré prekračuje zvolenú maximálnu hodnotu opotrebenia a následne dochádza k lomu VBD. Pri použití posuvu $f_z = 0,4 \text{ mm}$ dochádza k prekročeniu maximálnej hodnoty opotrebenia VB_{krit} už po prvom prejazde. U posuvu $f_z = 0,6 \text{ mm}$ dochádza v čase $T = 0,7 \text{ min}$ k lomu VBD.



Graf 3.3 Priebeh opotrebenia pri reznej rýchlosti $v_c = 100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

Z grafu 3.3 bola určená trvanlivosť nástroja až po dosiahnutie zvoleného optimálneho opotrebenia na chrbte nástroja VB_{krit} . Pre jednotlivé rezné podmienky, na základe trvanlivosti, bol podľa vzorca 3.5.3 vypočítaný objem odobraného materiálu. Hodnoty trvanlivosti sú uvedené v tabuľke 3.19 a porovnané s ostatnými výsledkami trvanlivosti v grafe 3.8, objemy odobraného materiálu sú v tabuľke 3.19. a porovnanie s ostatnými hodnotami je v grafe 3.7.

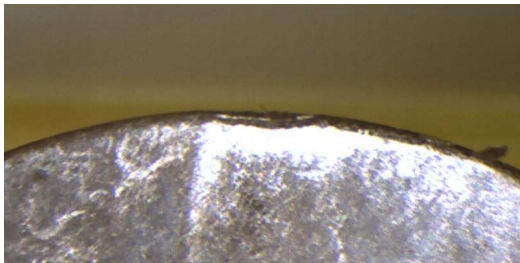
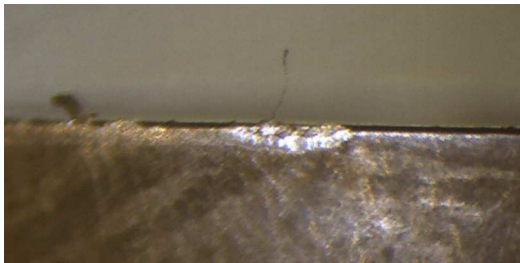

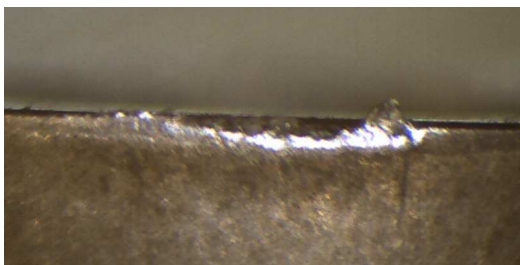
Spracovanie výsledkov pre súbežne frézovanie pri reznej rýchlosti $v_c = 50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ Tab. 3.11 Priebeh opotrebovania nástroja pri súbežnom frézovaní ($v_c = 50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$)

Rezné parametre: rezná rýchlosť $v_c=50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ posuv na zub $f_z=0,25 \text{ mm}$				
Plocha čela A_γ			Plocha chrbta A_α	
prejazd	t_{As} [min]	Q [cm^3]	Hlavný chrbát A_α VB_{Bmax} [mm]	Hlavný chrbát A_α VB_c [mm]
i=2	3	4	0,18	0,09
				
i=4	6	8	0,21	0,10
i=6	9	12	0,21	0,11
i=8	12	16	0,22	0,12
i=10	15	20	0,24	0,12
i=12	18	24	0,26	0,14
i=14	21	28	0,30	0,17
				

V tabuľke 3.11 je zdokumentovaný priebeh opotrebovania chrbta a čela ostria VBD zo spekaného karbidu pri súbežnom čelnom frézovaní, pri použití reznej rýchlosti $v_c = 50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuvu na zub $f_z = 0,25 \text{ mm}$. Zrovnanie objemu odobratého materiálu s ostatnými reznými podmienkami je v tab. 3.20. Z tabuľky 3.11 vyplýva, že po

dvanástom prejazde bola prekročená kritická hodnota opotrebenia na chrbte $VB_{krit.}$, konečná nameraná hodnota VB_{max} bola 0,30 mm. Pri obrábaní dochádzalo k vzniku plastickej deformácie na chrbte nástroja, ktorá zapríčinila vznik nárastku v priebehu celého obrábania. Oopotrebovanie čela bolo minimálne a dal sa dobre a presne odhadnúť jeho nasledujúci vývoj.

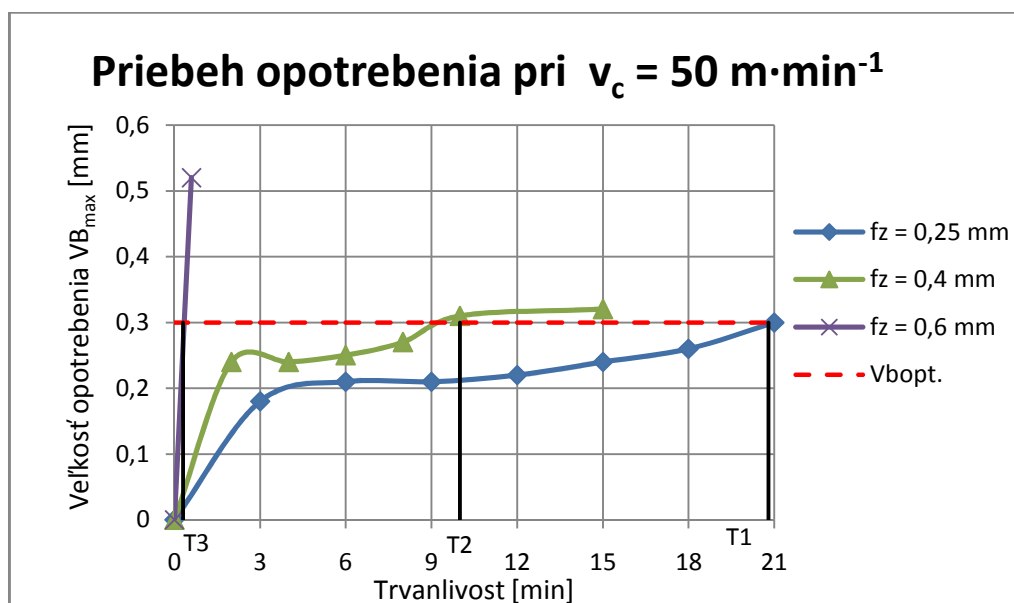
Tab. 3.12 Priebeh opotrebovania nástroja pri súbežnom frézovaní ($v_c = 50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$)

Rezné parametre: rezná rýchlosť $v_c=50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ posuv na zub $f_z=0,40 \text{ mm}$				
Plocha čela A_γ			Plocha chrbta A_α	
prejazd	t_{As} [min]	Q [cm ³]	Hlavný chrbát A_α VB_{Bmax} [mm]	Hlavný chrbát A_α VB_c [mm]
i=2	2	4	0,22	0,13
				
i=4	4	8	0,24	0,14
i=6	6	12	0,25	0,15
i=8	8	16	0,27	0,15
i=10	10	20	0,31	0,17
i=12	12	24	0,32	0,17
				

V tabuľke 3.12 je zdokumentovaný priebeh opotrebenia chrbta ostria VBD pri súbežnom čelnom frézovaní za použitia reznej rýchlosti $v_c = 50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a posuvu

$f_z = 0,40$ mm. Z tabuľky 3.12 vyplýva, že už pri desiatom prejazde bola prekročená kritická hodnota opotrebenia na chrbte $VB_{krit.}$, konečná nameraná hodnota $VB_{max.}$ bola 0,32 mm. V prvých minútach frézovania dochádzalo k intenzívnemu opotrebovaniu, ktorého intenzita sa časom zmenšila. S narastajúcimi minútami nástroja v zábere sa zväčšoval nárastok na nástroji, ktorý nepriaznivo ovplyvňoval odchod triesky z miesta rezu. Zrovnanie objemu odobratého materiálu s ostatnými reznými podmienkami je v grafe 3.8. Pri frézovaní s posuvom $f_z = 0,60$ mm sa dosiahla už po prvom prejazde hodnota opotrebovania chrbta $VB_{max} = 0,52$ mm, táto hodnota prekročila zvolenú maximálnu hodnotu opotrebenia chrbta nástroja. Pri meraní bolo viditeľné veľké opotrebenie chrbta a tiež vznik nárastku.

Na základe merania opotrebenia rezného klina bola vytvorená závislosť na čase $T-v_c$ túto závislosť je možné vidieť v grafe 3.4. Z grafu vyplýva, že priebeh opotrebenia VBD pri posuve $f_z = 0,25$ mm je podľa popisu literatúry. Na začiatku sa ostrie otupuje rýchlo, v druhej fáze opotrebenie narastá pozvoľne, až do momentu, kedy nastane tretia fáza. V tretej fáze nastane zrýchlene opotrebenie nástroja a strata možnosti ďalšieho obrábania. V prípade posuvu $f_z = 0,25$ mm, $f_z = 0,40$ mm priebeh opotrebenia vykazuje znaky postupného opotrebenia podľa literatúry. Na začiatku frézovania opotrebenie narastá vysokou rýchlosťou, po dosiahnutí opotrebenia $VB_{max} = 0,2$ mm v prípade posuvu $f_z = 0,25$ a opotrebenia $VB_{max} = 0,25$ v prípade posuvu $f_z = 0,4$ mm sa rast opotrebenia spomalí.

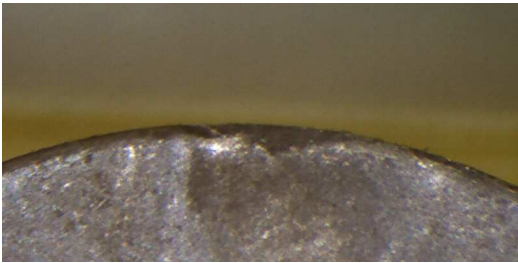
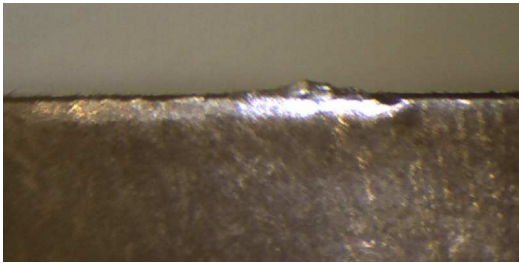
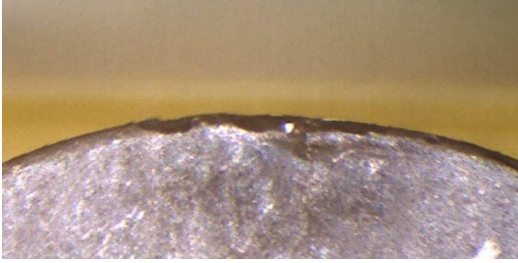
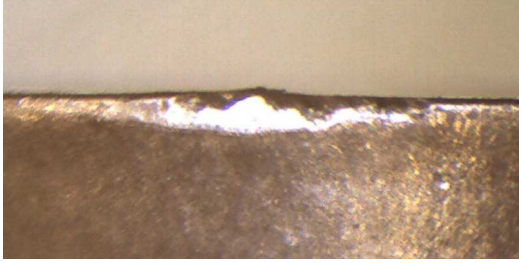


Graf. 3.4 Priebeh opotrebenia pri reznej rýchlosti $v_c = 50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Z grafu 3.4 bola určená trvanlivosť nástroja pri dosiahnutí zvoleného kritického opotrebenia na chrbte nástroja VB_{krit} . Pre jednotlivé rezné podmienky, na základe dosiahnutej trvanlivosti bol podľa vzorca 3.5.3 vypočítaný objem odobraného materiálu. Hodnoty trvanlivosti sú uvedené v tabuľke 3.20 a porovnané s ostatnými výsledkami trvanlivosti v grafe 3.8, objemy odobraného materiálu sú v tabuľke 3.20. a porovnanie s ostatnými hodnotami je v grafe 3.7.

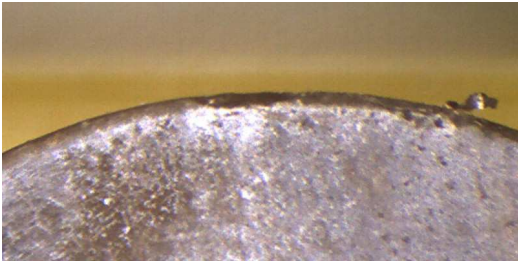
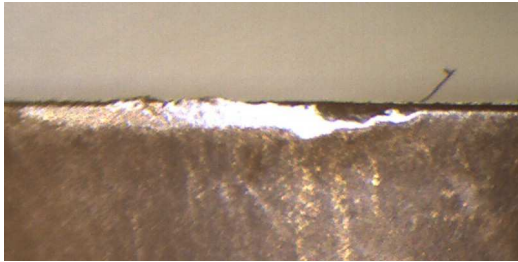
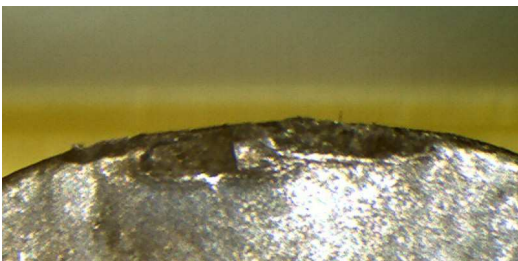
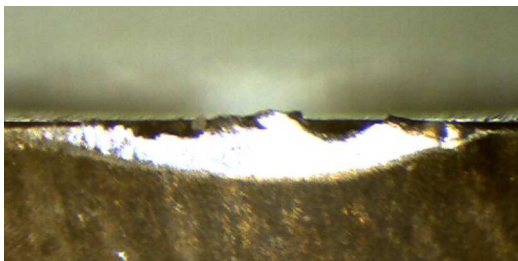
Spracovanie výsledkov pre súbežné frézovanie pri reznej rýchlosti $v_c = 80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Tab. 3.13 Priebeh opotrebovania nástroja pri súbežnom frézovaní ($v_c = 80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$)

Rezné parametre: rezná rýchlosť $v_c = 80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ posuv na zub $f_z = 0,25 \text{ mm}$				
Plocha čela A_γ			Plocha chrbta A_α	
prejazd	t_{As} [min]	Q [cm ³]	Hlavný chrbát A_α VB_{Bmax} [mm]	Hlavný chrbát A_α VB_c [mm]
i=2	2	4	0,19	0,09
				
i=4	4	8	0,20	0,10
i=6	6	12	0,22	0,12
i=8	8	16	0,28	0,14
i=10	10	20	0,29	0,16
i=12	12	24	0,30	0,18
				

V tabuľke 3.13 je zdokumentovaný priebeh opotrebenia chrbta a čela ostria VBD pri súbežnom čelnom frézovaní s použitím reznej rýchlosti $v_c = 80 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a posuvu na zub $f_z = 0,25 \text{ mm}$. Z tab. 3.13 vyplýva, že požadovanú hodnotu $VB_{\text{krit.}}$ sa podarilo dosiahnuť pri dvanástom prejazde. Výsledná nameraná hodnota po poslednom prejazde bola $VB_{\text{max}} = 0,30 \text{ mm}$. Opotrebenie čela prebiehalo v prijateľnom rozsahu, ale pri poslednom prejazde bolo na reznom kline viditeľné značne tepelne zaťaženie.

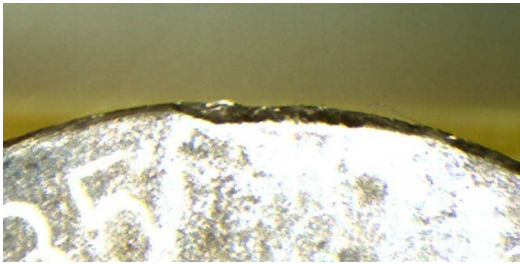
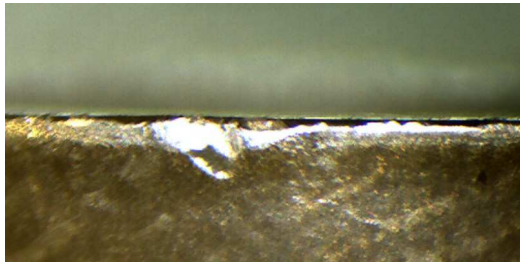
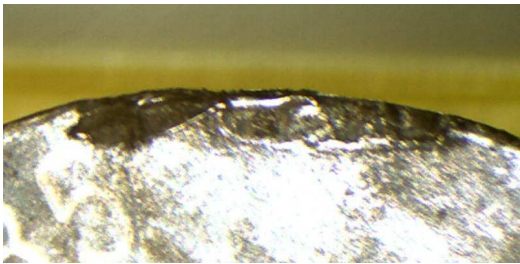
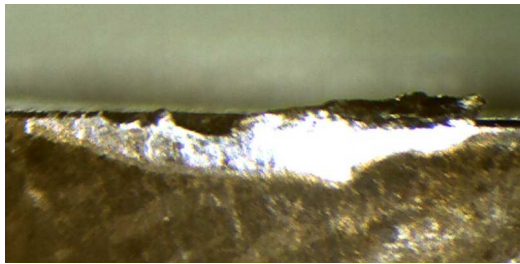
Tab. 3.14 Priebeh opotrebovania nástroja pri súbežnom frézovaní ($v_c = 80 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$)

Rezné parametre: rezná rýchlosť $v_c = 80 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ posuv na zub $f_z = 0,40 \text{ mm}$				
Plocha čela A_γ			Plocha chrbta A_α	
prejazd	t_{As} [min]	Q [cm ³]	Hlavný chrbát A_α $VB_{B\text{max}}$ [mm]	Hlavný chrbát A_α VB_c [mm]
i=2	1,2	4	0,27	0,14
				
i=4	2,4	8	0,36	0,18
i=6	3,6	12	0,45	0,25
				

V tabuľke 3.14 je zdokumentovaný priebeh opotrebenia chrbta a čela ostria VBD pri súbežnom čelnom frézovaní s použitím reznej rýchlosti $v_c = 80 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a posuvu na zub $f_z = 0,40 \text{ mm}$. Z tabuľky. 3.14 vyplýva, že požadovaná hodnota $VB_{\text{krit.}}$

bola dosiahnutá pri štvrtom prejazde. Pričom bolo intenzívne opotrebované čelo aj chrbát VBD. Na čele VBD vznikol kráter, ktorý zapríčinil zlú kvalitu obrábaného povrchu. Na chrbte VBD dochádzalo ku vzniku nárastku. Výsledná nameraná hodnota po poslednom prejazde bola $VB_{\max} = 0,45$ mm. Pri obrábaní bolo namerané intenzívne opotrebenie čela a chrbta nástroja. Na čele VBD vznikol po 2 minúte kráter, ktorý vznikol ako dôsledok abrazívneho opotrebenia.

Tab. 3.15 Priebeh opotrebovania nástroja pri súbežnom frézovaní ($v_c = 80 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$)

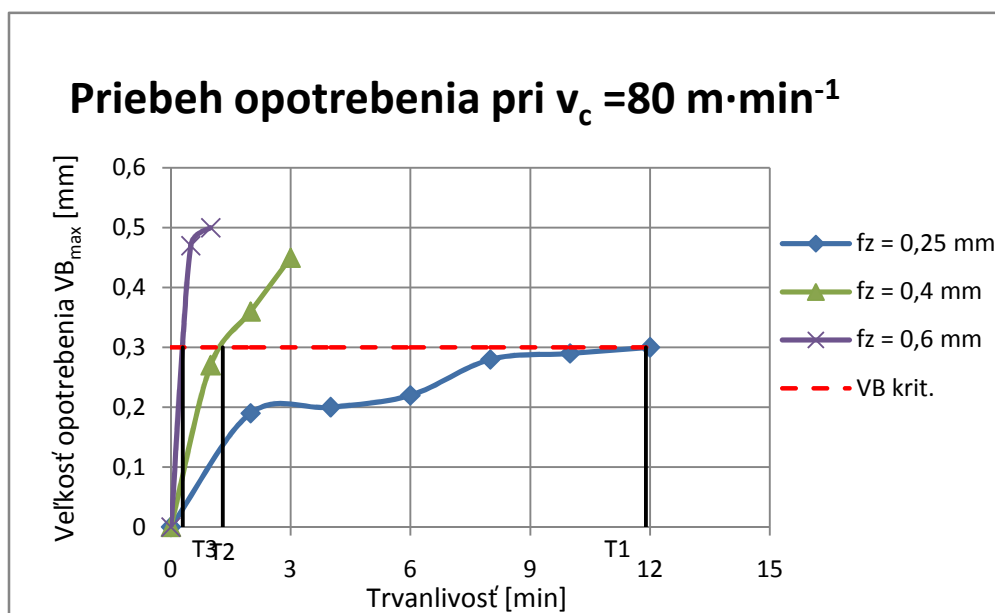
Rezné parametre: rezná rýchlosť $v_c = 80 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ posuv na zub $f_z = 0,60 \text{ mm}$				
Plocha čela A_γ			Plocha chrbta A_α	
prejazd	t_{As} [min]	Q [cm ³]	Hlavný chrbát A_α $VB_{B\max}$ [mm]	Hlavný chrbát A_α VB_c [mm]
i=2	0,9	4	0,47	0,21
				
i=4	1,8	8	0,52	0,26
				

V tabuľke 3.15 je zdokumentovaný priebeh opotrebenia chrbta ostria VBD pri súbežnom čelnom frézovaní za použitia reznej rýchlosti $v_c = 80 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a posuvu $f_z = 0,60 \text{ mm}$. Z tabuľky 3.15 vyplýva, že už pri prejazde bola prekročená kritická hodnota opotrebenia na chrbte $VB_{\text{krit.}}$, konečná nameraná hodnota VB_{\max} bola

0,52 mm. Pri obrábaní vznikalo vrubové opotrebovanie na chrbtovej ploche. Vrub vznikol v mieste kontaktu rezného klina s bokom triesky.

Na základe merania opotrebenia rezného klina bola vytvorená závislosť na čase $T-v_c$, táto závislosť je zobrazená v grafe 3.5. Z grafu 3.5 vyplýva, že priebeh opotrebenia VBD pri posuve $f_z = 0,25$ mm má parametre správneho, postupného opotrebenia. Na začiatku frézovania sa ostrie opotrebováva pomerne rýchlo, v nasledujúcej fáze sa hodnota opotrebenia nezvyšuje. Pri dosiahnutí času $T = 6$ min začne opotrebenie zase narastať.

V prípade posuvu $f_z = 0,25$ mm, $f_z = 0,40$ mm priebeh opotrebenia vykazuje znaky rýchleho opotrebenia. Posuvy $f_z = 0,25$ mm, $f_z = 0,40$ mm v kombinácií s reznou rýchlosťou $v_c = 50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ sú nevhodné na obrábanie titánových zliatin.

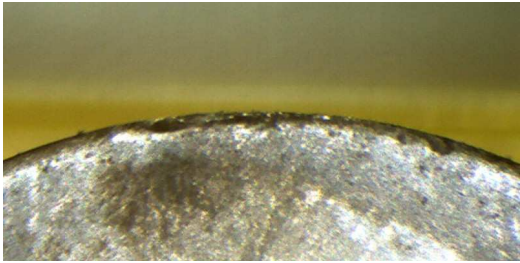
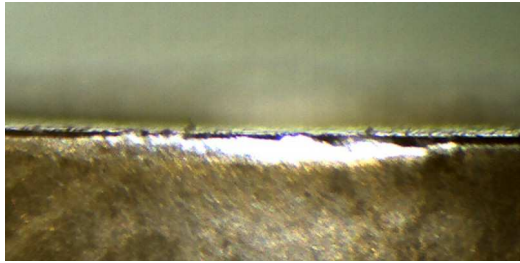
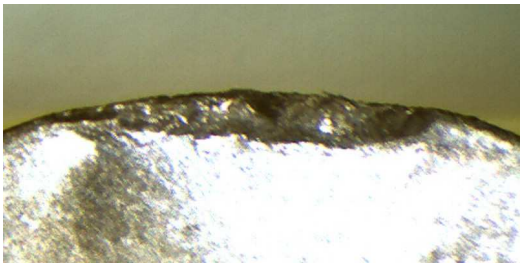
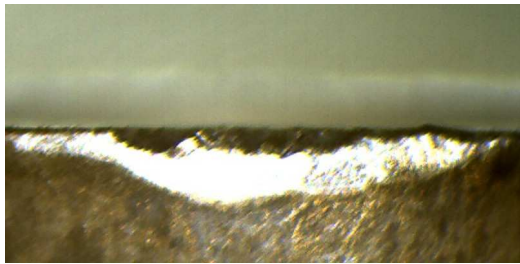


Graf 3.5 Priebeh opotrebenia pri reznej rýchlosti $v_c = 80 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

Z grafu 3.4 bola určená trvanlivosť nástroja pri dosiahnutí zvoleného kritického opotrebenia na chrchte nástroja VB_{krit} . Pre jednotlivé rezné podmienky, na základe dosiahnutej trvanlivosti, bol podľa vzorca 3.5.3 vypočítaný objem odobraného materiálu. Hodnoty trvanlivosti sú uvedené v tabuľke 3.20 a porovnané s ostatnými výsledkami trvanlivosti v grafe 3.8, objemy odobraného materiálu sú v tabuľke 3.20. a porovnanie s ostatnými hodnotami je v grafe 3.7.

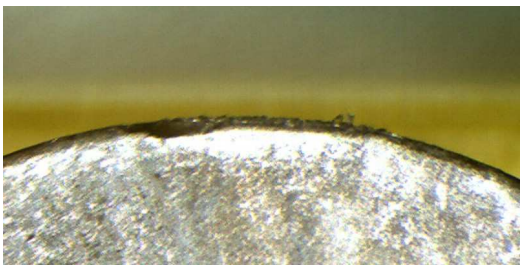
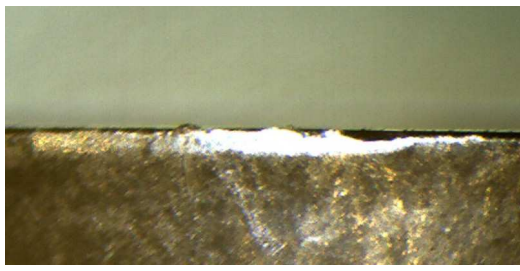
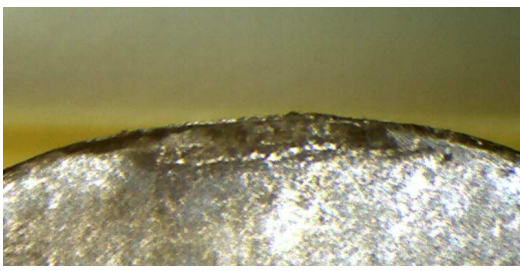

Spracovanie výsledkov pre súbežne frézovanie pri reznej rýchlosti $v_c = 100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Tab. 3.16 Priebeh opotrebovania nástroja pri súbežnom frézovaní ($v_c = 100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$)

Rezné parametre: rezná rýchlosť $v_c = 100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ posuv na zub $f_z = 0,25 \text{ mm}$				
Plocha čela A_γ			Plocha chrbta A_α	
prejazd	t_{As} [min]	Q [cm ³]	Hlavný chrbát A_α VB_{Bmax} [mm]	Hlavný chrbát A_α VB_c [mm]
i=2	1,66	4	0,47	0,21
				
i=4	3,32	8	0,52	0,26
				

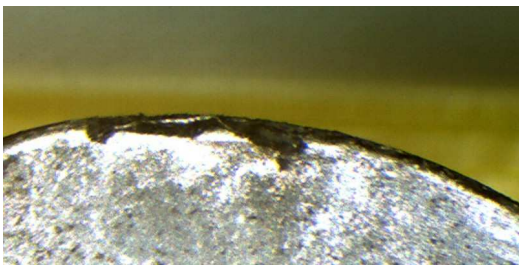
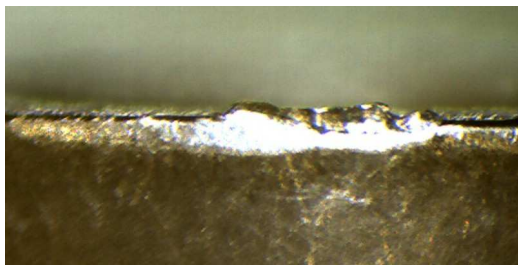
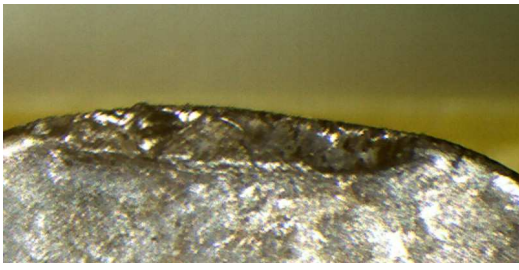
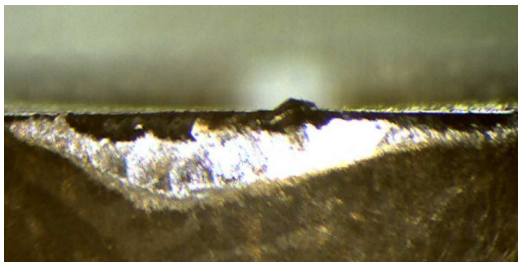
V tabuľke 3.16 je zdokumentovaný priebeh opotrebovania chrbta a čela rezného klina pri súbežnom čelnom frézovaní pri použití reznej rýchlosti $v_c = 100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuve na zub $f_z = 0,25 \text{ mm}$. Z tabuľky 3.16 vyplýva, že po druhom prejazde bola takmer dosiahnutá kritická hodnota opotrebovania na chrbte VB_{krit} , výsledná nameraná hodnota po štvrtom prejazde bola $VB_{max} = 0,52 \text{ mm}$. Na chrbtovú plochu pôsobilo intenzívne opotrebovanie, ktoré zapríčinilo vznik opotrebovania v tvare vrubu. Tieto okolnosti zapríčinili skrátenie trvanlivosti nástroja na minútu a pol. Na čele nástroja vzniklo opotrebovanie v tvare žliabku. Po spustení ďalšieho prejazdu nastal lom VBD.

Tab. 3.17 Priebeh opotrebovania nástroja pri súbežnom frézovaní ($v_c = 100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$)

Rezné parametre: rezná rýchlosť $v_c = 100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ posuv na zub $f_z = 0,40 \text{ mm}$				
Plocha čela A_γ			Plocha chrbta A_α	
prejazd	t_{As} [min]	Q [cm^3]	Hlavný chrbát A_α VB_{Bmax} [mm]	Hlavný chrbát A_α VB_c [mm]
i=1	0,5	2	0,22	0,11
				
i=2	1	4	0,39	0,22
				

V tabuľke 3.17 je zdokumentovaný priebeh opotrebovania chrbta a čela ostria VBD pri súbežnom čelnom frézovaní pri použití reznej rýchlosti $v_c = 100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a posuve na zub $f_z = 0,4 \text{ mm}$. Pri obrábaní dochádzalo k intenzívnemu opotrebovaniu čela a chrbta rezného nástroja. Z tohto dôvodu bol skrátenejší interval medzi jednotlivými meraniami na jeden prejazd, ktorý trval pol minúty. Po 48 sekundách bola prekročená kritická hodnota opotrebovania na chrbte $VB_{krit.}$, konečná nameraná hodnota VB_{max} bola $0,39 \text{ mm}$.

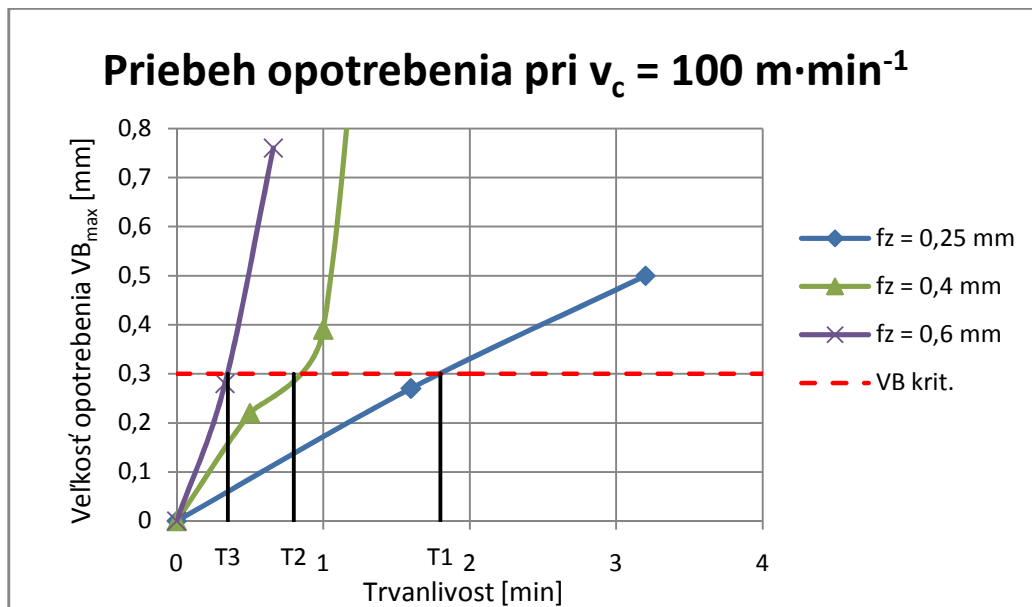
Tab. 3.18 Priebeh opotrebovania nástroja pri súbežnom frézovaní ($v_c = 100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$)

Rezné parametre: rezná rýchlosť $v_c = 100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ posuv na zub $f_z = 0,60 \text{ mm}$				
Plocha čela A_γ			Plocha chrbta A_α	
prejazd	t_{As} [min]	Q [cm^3]	Hlavný chrbát A_α VB_{Bmax} [mm]	Hlavný chrbát A_α VB_c [mm]
i=1	0,5	2	0,22	0,11
				
i=2	1	4	0,39	0,22
				

V tabuľke 3.18 je zdokumentovaný priebeh opotrebenia chrbta a čela ostria VBD pri súbežnom čelnom frézovaní pri použití reznej rýchlosti $v_c = 100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a posuve na zub $f_z = 0,6 \text{ mm}$. Pri obrábaní dochádzalo k intenzívnemu opotrebovaniu v tvare žliabku na čelnej ploche, na ploche chrbta rezného nástroja bolo viditeľné intenzívne opotrebenie, a taktiež dochádzalo k nalepovaniu obrábaného materiálu na rezný klin čo viedlo k tvorbe nárastku, ktorý zmenil geometriu nástroja. Z tohto dôvodu bol ponechaný skrátenejší interval medzi jednotlivými meraniami na jeden prejazd. Z tabuľky 3.18 vyplýva, že po druhom prejazde bola prekročená kritická hodnota opotrebenia na chrbte $VB_{krit.}$, konečná nameraná hodnota VB_{max} bola 0,39 mm.

Na základe merania opotrebenia rezného klina bola vytvorená závislosť na čase $T-v_c$ táto závislosť je zobrazená v grafe 3.6. Z grafu 3.6 vyplýva, že priebeh opotrebenia VBD pri reznej rýchlosti $v_c = 100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ je veľmi intenzívny pri všetkých

použitých posuvových rýchlostiach. Zrovnanie odobratého materiálu je uvedené v grafe 3.8.

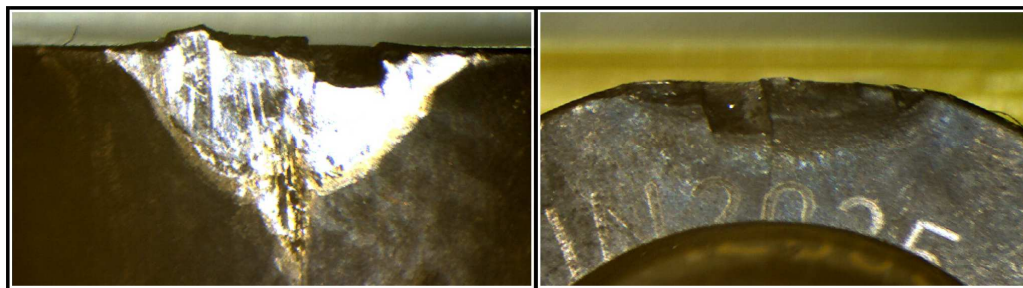


Graf. 3.6 Priebeh opotrebenia pri reznej rýchlosti $v_c = 100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

Z grafu 3.6 bola určená trvanlivosť nástroja pri dosiahnutí zvoleného kritického opotrebenia na chrbte nástroja VB_{krit} . Pre jednotlivé rezné podmienky, na základe dosiahnutej trvanlivosti bol podľa vzorca 3.5.3 vypočítaný objem odobraného materiálu. Hodnoty trvanlivosti sú uvedené v tabuľke 3.20 a porovnané s ostatnými výsledkami trvanlivosti v grafe 3.8, objemy odobraného materiálu sú v tabuľke 3.20. a porovnanie s ostatnými hodnotami je v grafe 3.7.

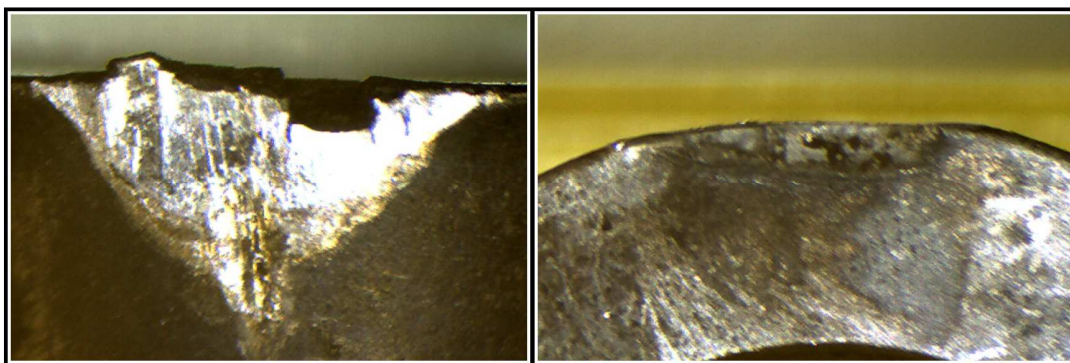
Spracovanie výsledkov pre súbežné frézovanie pri reznej rýchlosti $v_c = 130 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

Pri obrábaní titánovej zliatiny reznou rýchlosťou $v_c = 130 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ dochádzalo k veľmi intenzívnemu opotrebeniu chrbta VBD. Pri použitom posuve $f_z = 0,25 \text{ mm}$ už po jednej minúte nastalo opotrebenie v tvare vrubu, VB_{max} dosiahlo hodnotu 1,99 mm a taktiež bolo viditeľné intenzívne opotrebenie čela v tvare žliabku vid'. obr. 3.10.



Obr. 3.10 Opatrebenie VBD pri frézovaní s posuvom $f_z = 0,25$ mm po druhom prejazde

Pri obrábaní s posuvom $f_z = 0,4$ mm, na čelnej ploche rezného klina bolo viditeľné veľké tepelné zaťaženie, ktoré zapríčinilo intenzívne opotrebenie v tvare žliabku. Na chrbtovej ploche vzniklo opotrebenie v tvare vrubu vid'. obr. 3.11. Z tohto dôvodu bol experiment ukončený a v obrábaní sa ďalej nepokračovalo.



Obr. 3.11 Opatrebenie VBD pri frézovaní s posuvom $f_z = 0,4$ mm po druhom prejazde

3.6.1 Vyhodnotenie trvanlivosti nástroja a objemu odobratého materiálu

Tab. 3.19 Zhrnutie hodnôt trvanlivosti a objemu odobratého mat. pri nesúbežnom frézovaní

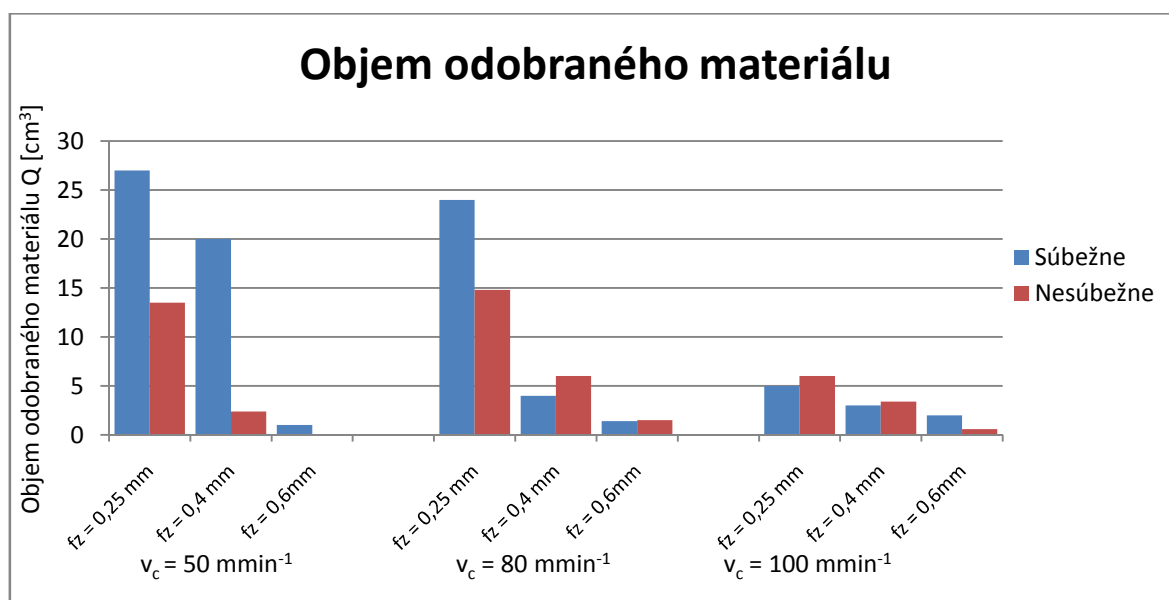
	$f_z = 0,25$ mm		$f_z = 0,4$ mm		$f_z = 0,6$ mm	
	T	Q	T	Q	T	Q
$v_c = 50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$	10,6	13,5	1,2	2,4	—	—
$v_c = 80 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$	7,3	14,8	1,9	6	0,3	1,5
$v_c = 100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$	2,3	5,8	0,8	3,4	0,1	0,6

Objem odobratého materiálu bol vypočítaný zo vzorca 3.5.3. Hodnota t_{As} je doba nástroja v zábere pri dosiahnutí kritického opotrebenia na chrbte nástroja $VB_{krit.}$

Hodnoty odobraného materiálu a príslušnej dosiahnutej trvanlivosti pri nesúbežnom a súbežnom frézovaní sú zobrazené v grafe 3.7.

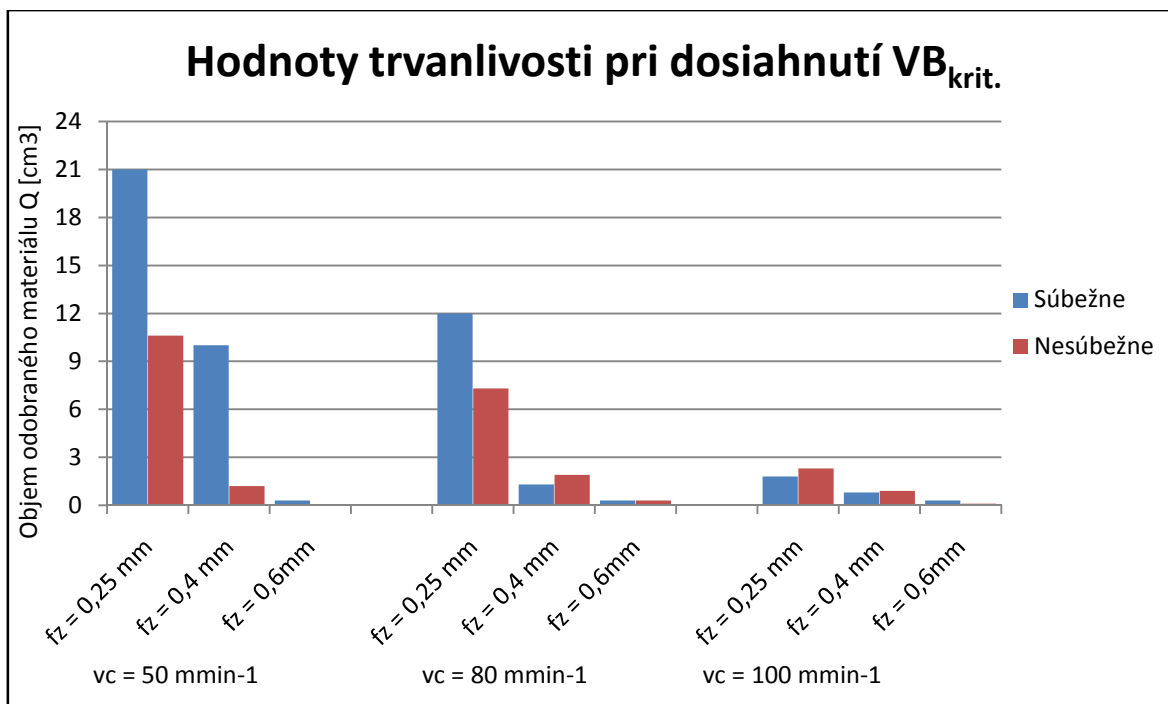
Tab. 3.20 Zhrnutie hodnôt trvanlivosti a objemu odobratého mat. pri súbežnom frézovaní

	$f_z = 0,25 \text{ mm}$		$f_z = 0,4 \text{ mm}$		$f_z = 0,6 \text{ mm}$	
	T	Q	T	Q	T	Q
$v_c = 50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$	21	28	10	20	0,3	1
$v_c = 80 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$	12	24	1,3	4	0,3	1,4
$v_c = 100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$	1,8	5	0,8	3	0,35	2



Graf. 3.7 Objem odobraného materiálu

Z grafu 3.7 vyplýva, že najväčšie množstvo materiálu bolo odobraté pri súbežnom frézovaní s použitím reznej rýchlosti $v_c = 50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a posuvu $f_z = 0,25 \text{ mm}$, dosiahnutá hodnota bola 28 cm^3 . Ďalej môžeme v grafe pozorovať, že celkovo sa pri súbežnom frézovaní odobralo viac materiálu. Z grafu 3.7 je dobre viditeľné, že dobrých výsledkov z hľadiska odobratého materiálu sa ešte dosiahlo pri súbežnom frézovaní s reznými nastaveniami $v_c = 50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $f_z = 0,25 \text{ mm}$ a $v_c = 80 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $f_z = 0,25 \text{ mm}$, a pri nesúbežnom frézovaní sa dosiahlo najlepších výsledkov s použitím $v_c = 80 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $f_z = 0,25 \text{ mm}$. Pri použití $v_c = 100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a posuve $f_z = 0,6 \text{ mm}$ sa dosiahlo minimálnych hodnôt pri všetkých použitých rýchlostiach.



Graf. 3.8 Hodnoty trvanlivosti

Z grafu 3.8 je možné jednoznačne určiť najvhodnejšie rezne podmienky z hľadiska najdlhšej trvanlivosti rezného nástroja. Je to súbežne frézovanie s použitím reznej rýchlosti $v_c = 50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuvu $f_z = 0,25 \text{ mm}$. Ako úplne nevhodný sa ukázal posuv $f_z = 0,6 \text{ mm}$ v kombinácií so všetkými reznými rýchlosťami v_c .

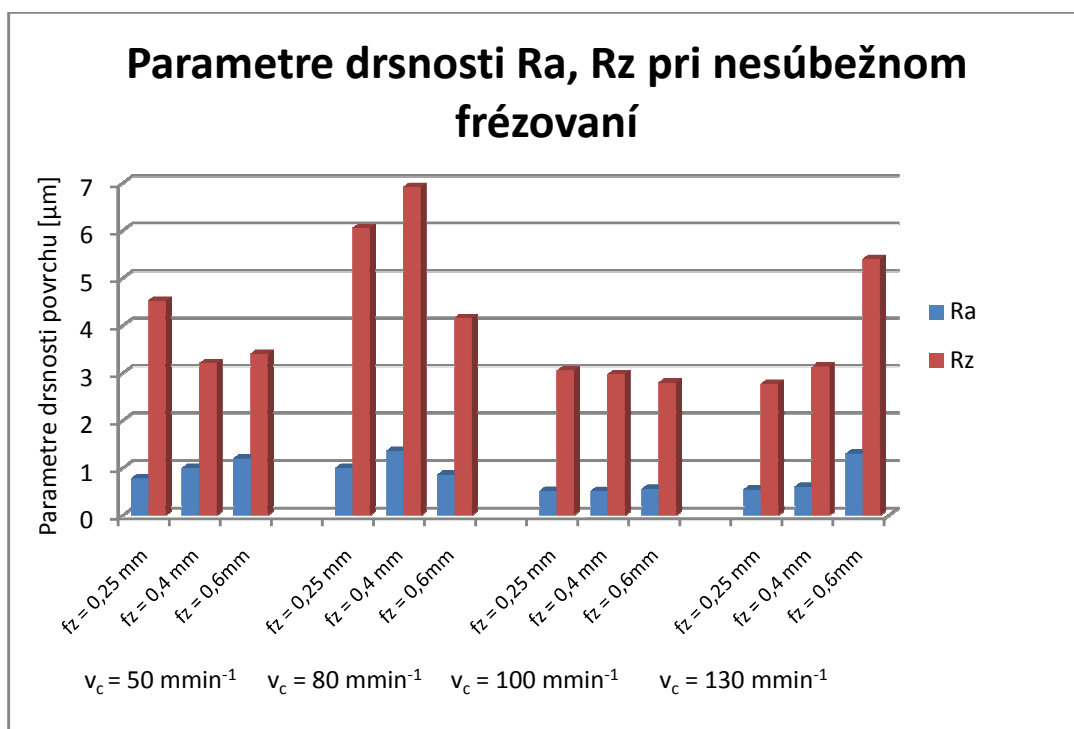
3.6.2 Porovnanie parametrov drsnosti R_a a R_z pri frézovaní titanovej zliatiny

Meranie vybraných parametrov drsnosti bolo vykonané v priečnom a pozdĺžnom smere pričom každý smer sa meral tri krát. Meranie bolo vykonané na dotykovom meracom prístroji SurfTest SJ- 210 od firmy Mitutoyo. Tento prístroj sa používa k meraniu charakteristík drsnosti povrchu. Drsnosť bola meraná snímacím hrotom, ktorý bol vybavený diamantovým hrotom. Polomer zaoblenia špičky hrotu bol $2 \mu\text{m}$ s vrcholovým uhlom 60° . Meranie prebiehalo pri prítláčnej sile $0,75 \text{ mN}$.

Tab. 3.21 Namerané hodnoty drsnosti obrobeného povrchu pri nesúbežnom frézovaní

	$f_z = 0,25 \text{ mm}$		$f_z = 0,4 \text{ mm}$		$f_z = 0,6 \text{ mm}$	
	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
$v_c = 50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$	0,778	4,518	0	0	0	0
$v_c = 80 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$	1,001	6,05	1,358	6,916	0,858	4,157
$v_c = 100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$	0,516	3,05	0,514	2,97	0,557	2,795
$v_c = 130 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$	0,545	2,767	0,604	3,135	1,3	5,4

Pre porovnanie parametrov drsnosti Ra a Rz pri nesúbežnom frézovaní bola použitá priemerná hodnota výberu meraných drsnosti Ra a Rz. Z grafu 3.9 vyplýva, že pri zvýšení reznej rýchlosti v_c dochádza k zmenšovaniu hodnôt drsnosti Ra a Rz. Ďalej je patrné, že pri reznej rýchlosti $v_c = 80 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a posuvoch $f_z = 0,25 \text{ mm}$ a $f_z = 0,4 \text{ mm}$ sme dosiahli najhoršiu drsnosť povrchu.

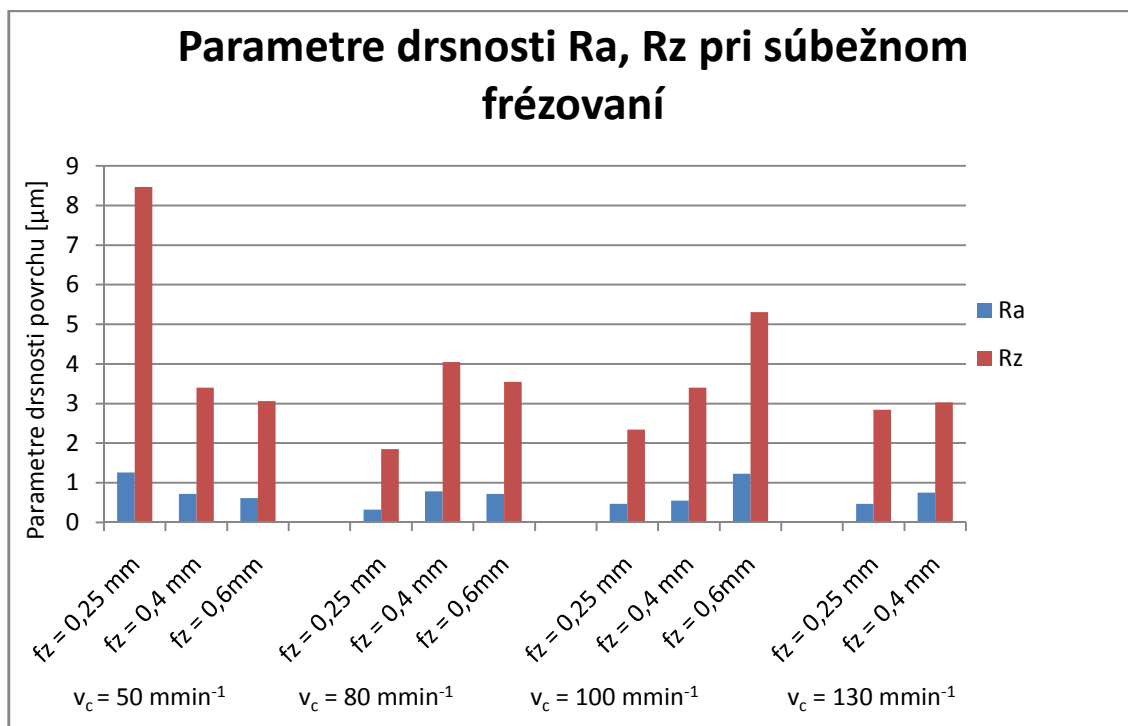


Graf. 3.9 Porovnanie parametrov drsnosti Ra a Rz pri nesúbežnom frézovaní

Tab. 3.22 Namerané hodnoty drsnosti obrobeného povrchu pri súbežnom frézovaní

	$f_z = 0,25 \text{ mm}$		$f_z = 0,4 \text{ mm}$		$f_z = 0,6 \text{ mm}$	
	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
$v_c = 50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$	1,262	8,463	0,715	3,4	0,610	3,06
$v_c = 80 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$	0,321	1,854	0,783	4,051	0,72	3,547
$v_c = 100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$	0,47	2,34	0,549	3,401	1,23	5,308
$v_c = 130 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$	0,47	2,84	0,754	3,031	0	0

Pre porovnanie parametrov drsnosti Ra a Rz pri nesúbežnom frézovaní bola použitá priemerná hodnota výberu meraných drsnosti Ra a Rz. Z grafu 3.10 vyplýva, že pri zvýšení reznej rýchlosti v_c nedochádzalo k výraznému zhoršovaniu drsnosti Ra a Rz. Tiež je z grafu 3.10 je zjavné, že pri reznej rýchlosti $v_c = 50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a posuve $f_z = 0,25 \text{ mm}$ boli namerané najhoršie hodnoty drsnosti povrchu. Ďalej je patrné, že pri použití posuvu $f_z = 0,4 \text{ mm}$ boli namerané nízke hodnoty parametru drsnosti Ra.

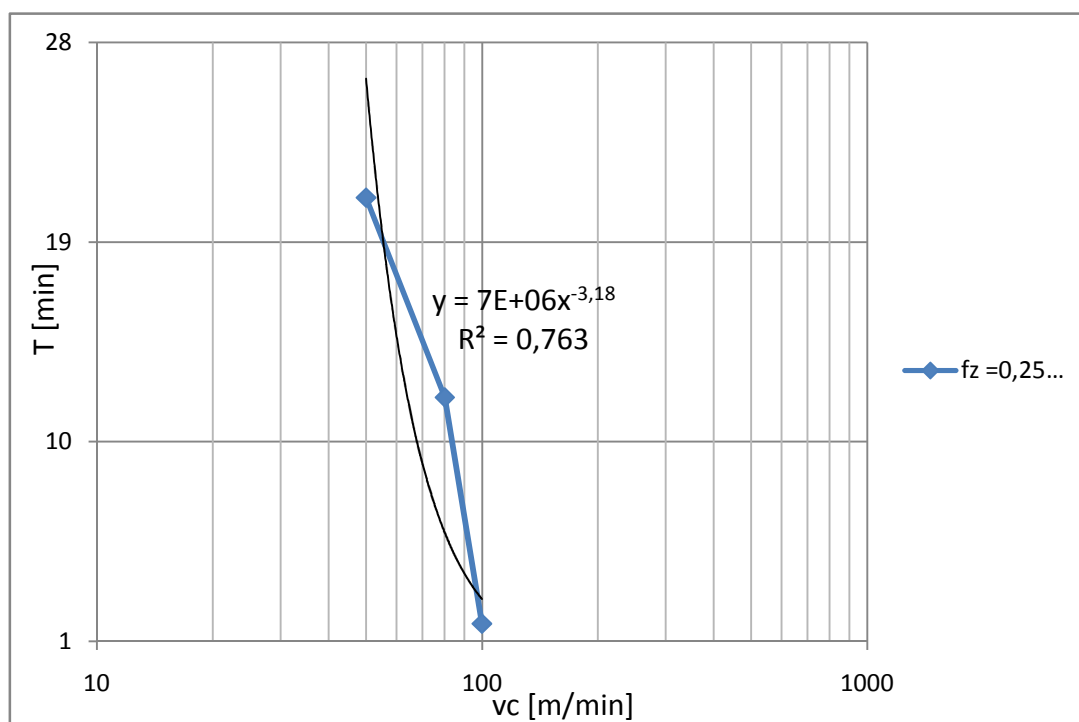


Graf. 3.10 Porovnanie parametrov drsnosti Ra a Rz pri súbežnom frézovaní

3.6.3 Zistenie Parametrov rezivosti

Zjednodušený tvar $T-v_c$ závislosti je tiež jednoduchým kritériom pre hodnotenie rezivosti nástroja. Rezivosť nástroja je možno charakterizovať ako vlastnosť, ktorá umožňuje nástroju efektívnym spôsobom odoberať triesku z povrchu obrábaného materiálu. Rezivosť nástroja často súvisí s fyzickými a mechanickými vlastnosťami rezného nástroja, chemickým zložením, druhom obrábania, reznou geometriou nástroja, reznými podmienkami a prostredím. Rezivosť je relatívna charakteristika, ktorá vychádza z intenzity opotrebenia rezného klina. Keďže rezivosť úzko súvisí aj na fyzikálnych a mechanických vlastnostiach obrábaného materiálu, tak je veľmi úzko zviazaná s pojmom obrobiteľnosť.

Stanovenie rezivosti nástrojového materiálu použitého pre experimentálne obrábanie zliatiny UNS R56260 vyžadovalo zakresliť získané hodnoty trvanlivosti VBD do závislosti $T = f(v_c)$ v logaritmických súradniciach vid' graf. 3.11



Graf. 3.11 $T-v_c$ diagram v logaritmických súradniciach

Zo obrázku 2.10 sme vypočítali exponent m , následne vypočítame C_v pre použitý rezný materiál.

$$m = \operatorname{tg} \alpha$$

$$m = \operatorname{tg} 72^\circ 32'$$

$$m = 3,18 \quad [-]$$

$$C_T = 7000000$$

$$C_v = C_T^{1/m}$$

$$c_v = 7000000^{1/3,18}$$

$$c_v = 142 \quad [-]$$

Podľa tabuľky hodnota exponentu m odpovedá hodnote, ktorú uvádza doporučená literatúra.

Tab. 3.23 Výsledne konštanty C_T, C_v a exponentu

m	C_T	C_v
3,18	7000000	142

Záver

Cieľom diplomovej práce bolo obrábanie titánovej zliatiny UNS R56 260. Táto zliatina sa v dnešnej dobe vo veľkom množstve využíva v leteckom priemysle. Jednou z hlavných príčin poklesu efektivity pri obrábaní titánových zliatin je nízka trvanlivosť rezných nástrojov. Z tohto dôvodu bolo cieľom dosiahnuť menšie opotrebovanie na chrbte a čele nástroja. Intenzívne opotrebovanie býva spôsobené tepelnou vodivosťou, deformačným spevňovaním materiálu. Testovaný bol rezný nástroj od firmy Ingeresoll Cutting Tools. Vymeniteľná rezná doštička bola vyrobená zo spekaného karbidu, opatrená vrchným povlakom z TiAlN, doštička mala kruhovú geometriu.

Použitie rezných nástrojov s kruhovou geometriou prináša v niektorých prípadoch značné výhody pri obrábaní. Predovšetkým je možné použiť vyššie hodnoty posuvových rýchlostí, a to aj pri zachovaní požadovanej kvality obrobeného povrchu. Ďalšou výhodou je dosahovaná trvanlivosť VBD, ktorú rezné nástroje dosahujú z dôvodu vyššej relatívnej pevnosti reznej hrany a tiež stability rezného procesu. Priebeh procesu obrábania nástrojom s kruhovou geometriou pozitívne ovplyvňuje veľkosť uhlu nastavenia rezného klína. Veľkosť tohto uhla ovplyvňuje spôsob prenikania rezného klína do obrábaného materiálu a následne aj pôsobenie síl na rezný klin nástroja. Geometria kruhových VBD je vhodná pre obrábanie veľkej časti materiálov a to aj pre titán a jeho zliatinu, ako je napríklad UNS R56260, ktoré majú vysoké požiadavky na technológiu opracovania. Pre efektívne obrábanie materiálov so zvýšenou pevnosťou však nestačí iba vhodný nástrojový materiál, rezná geometria a rezné podmienky, ale potrebné sú aj kvalitné, stabilné obrábacie stroje s dostatočným výkonom.

Na výsledky merania mala veľký vplyv stratégia frézovania, súbežne frézovanie vykázalo lepšie vlastnosti pri obrábaní titánu. Pri obrábaní nebolo použité chladenie, z dôvodu lepšieho pozorovania procesu oddeľovania triesky. Z tohto dôvodu vznikali v mieste rezu vyššie teploty, ktoré zapríčinili vznik nárastu a intenzívnejšie opotrebovanie nástroja. Pri vysokých teplotách vznikali tepelné trhliny, ktoré v kombinácii s mechanickým zaťažením spôsobovali vydrolovanie rezného klína a v niektorých prípadoch pri zvýšených posuvových rýchlostiach došlo k lomu VBD.

Z dôvodu absencie chladenia dochádzalo k prerezávaniu triesky, čo spôsobilo skrátenie trvanlivosti nástroja a zhoršenie kvality obrobeného povrchu.

Pri vyhodnotení trvanlivosti nástroja sa dosiahlo najlepších hodnôt trvanlivosti s použitím reznej rýchlosti $v_c = 50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a posuvu $f_z = 0,25 \text{ mm}$. V tomto prípade dosiahla trvanlivosť 21 minút, a opotrebovanie narastalo postupne a priebeh opotrebenia vykazoval znaky správneho opotrebenia ako uvádza literatúra. Z hľadiska odobraného materiálu boli najlepšie podmienky rezná rýchlosť $v_c = 50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a posuv $f_z = 0,25 \text{ mm}$ pri ktorých sa dobralo 28 cm^3 . Naopak ako úplne nevhodné sa zdajú byť rezne rýchlosti $v_c = 100, 130 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ pri použití každého posuvu f_z .

Pri skúmaní drsnosti titánovej zliatiny UNS R56260 bolo zistené, že najväčší vplyv na drsnosť povrchu má posuv na zuv f_z . V porovnaní súbežného a nesúbežného frézovania bolo zistené, že lepší povrch bol dosiahnutý pri súbežnom frézovaní. Rozdiely parametrov drsnosti R_a , R_z dosahovali pri súbežnom a nesúbežnom frézovaní iba malé rozdiely.

Prínosy diplomovej práce pre prax spočívajú v možnosti využitia výsledkov práce vo firmách, ktoré obrábajú titánovú zliatinu, taktiež práca umožňuje nastavenie vhodných rezných parametrov pre predikciu opotrebenia a trvanlivosti rezných nástrojov. Aplikácie suchého vysoko posuvového obrábania prináša ekonomické a ekologické aspekty a s tým spojené úspory hlavných a vedľajších časov výroby.

Zoznam použitej literatúry

- [1] ZWICKER, U. *Titan und Titanlegierungen*. New York: Springer-Verlag, 1974. ISBN 3-540-05233-x.
- [2] Titanium Engineers. [Http://www.titaniumengineers.com](http://www.titaniumengineers.com) [online]. [cit. 2017-02-09]. Dostupné z: <http://www.titaniumengineers.com/uploads/1/7/9/5/17957627/6246datasheet.pdf>
- [3] Grade 6Al 2Sn 4Zr 6Mo TitaniumAlloy. *Azom* [online]. 2013 [cit. 2017-02-09]. Dostupné z: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9305>
- [4] Obrábění titanových dílů. *Techmagazín* [online]. [cit. 2017-02-09]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/666>
- [5] NESLUŠAN, M. a CZÁN, A. *Obrábanie titánových a niklových zliatin*. Žilina: Žilinská univerzita, 2001. ISBN 8071009334.
- [6] Skupiny obráběných materiálů. *Sandvikcoromant* [online]. [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/workpiece_material_groups/pages/default.aspx
- [7] KOČMAN, K a PROKOP, J. Ekologické a technologické aspekty HSC obrábění. *Mmspektrum* [online]. Brno, 2001 [cit. 2017-02-11]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/ekologicke-a-technologicke-aspekty-hsc-obrabeni.html>
- [8] SKOPEČEK, T. *Základy vysokorychlostního obrábění - HSC*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. ISBN 80-7043-344-2.
- [9] *Důležité aspekty vysokorychlostního obrábění* [online]. 2002 [cit. 2017-02-11]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/dulezite-aspekty-vysokorychlostniho-obrabeni.html>
- [10] Suché frézování materiálu Ti6Al4V vysokými rychlostmi. *Mmspektrum* [online]. 2006 [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/suche-frezovani-materialu-ti6al4v-vysokymi-rychlostmi.html>

- [11] SANDVIK Coromant: Technická příručka. *Rbp* [online]. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: http://www.rpb.cz/sandvik_coromant_tg
- [12] HSC a bezpečnost práce. *Mmspektrum* [online]. 2005 [cit. 2017-02-11]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/hsc-a-bezpecnost-prace.html>
- [13] Frézování s vysokou rychlostí posuvu. *Sandvikcoromant* [online]. [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/application_overview/face_milling/high_feed_milling
- [13] Frézování žárovzdušných slitin a titanu. *Sandvik* [online]. [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/getting_started/milling_different_materials/hrsa_and_titanium_milling/pages/default.aspx
- [14] HighFeedMillingTechnology. *Secotools* [online]. [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: <http://www.secotools.com/cs/Global/Products/Milling/Highfeed-Milling/HFM-Technology/>
- [15] Nástrojové materiály. *Sandvikcoromant* [online]. [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/introduction/pages/default.aspx
- [16] KOČMAN, Karel. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
- [17] Nástrojové materiály. *Docplayer* [online]. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/8177193-Nastrojove-materialy.html>
- [18] *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. Praha: Scientia, 1997. ISBN 91-972299-4-6.
- [19] Řezné nástroje: Moderní řezné materiály 2. *Technický týdeník* [online]. 2011 [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/rezne-nastroje/rezne-nastroje-3_8515.html
- [20] DOLEŽALOVÁ, P. *Vlastnosti povlaků řezných nástrojů ze slinutého karbidu*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ing. Karel Osička PhD.

- [21] Povlak Eifeler ZrN: (zirkónium nitrid). *Commercservice* [online]. [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://www.commercservice.sk/zrn.html>
- [22] HOLUBÁŘ, P. Počítačová simulace růstu PVD povlaků a nová řada trojvrstevných povlaků. In: MM průmyslové spektrum. [online]. 2008 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/pocitacova-simulace-rustu-pvd-povlaku-a-nova-radatrojvrstevnych-povlaku.html>
- [23] Naša ponuka povlakov. *Staton* [online]. [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://www.staton.sk/sluzby/povlakovanie/nasa-ponuka-povlakov/>
- [24] COMMERC SERVICE. Povlak Eifeler CrN a CrCN. [online]. 2008 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.commercservice.sk/crn.html>
- [25] BRYCHTA, J. Technologie II. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [26] ŽAK, J., SAMEK, R., BUMBALEK, B. Specialniletecteketchnologie I. 1. vyd. Brno: tisk MTZ, provoz 34 Kyjov, 1990, 219 s. ISBN 80-214-0128-1.
- [27] ISO 3685:1993. *Tool Life Testing with Single Point Turning Tools*. 1993.
- [28] DE VOS, P. *MM Průmyslové spektrum :Příručka pro technology - Opatřebení se nevyhneme!* [online]. [vid. 8.4.2013]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-opotrebeni-se-nevyhneme.html>
- [29] Opatřebeníbřitu. *Http://www.sandvik.coromant.com* [online]. [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/wear_on_cutting_edges/pages/default.aspx
- [30] Tribologická analýza opotřebení. *Udrzbapodniku* [online]. 2015 [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: http://udrzbapodniku.cz/index.php?id=47&no_cache=1&tx_ttnews%5Btt_news%5D=6429&cHash=1a1a83981f&type=98
- [31] DMU 50/70 series: CNC universal milling machines [online]. In: . Sulzerallee, Švýcarsko: DMG MORI Europe AG, s. 20 [cit. 2017-04-20]. Dostupné z:

<http://en.dmgmori.com/blob/123874/dde0f533146bc1c6047edc7f022b26ac/pm0uk15-dmu-50-70-pdf-data.pdf>

[32] Kopierfräser 5W7G [online]. In: . IngersollGmbh, 2016 [cit. 2016-04-12].

Dostupné z: <http://www.imc-companies.com/Ingersollcatalog/Family.aspx?fnum=174&mapp=ML&app=5&GFSTYP=>

[33] RHKW1003M0TN: neutrale Schruppgeometrie [online]. In: . IngersollGmbh, 2016 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.imc-companies.com/IngersollCatalog/Family.aspx?fnum=10098&mapp=ML&app=5&GFSTYP=M>

[34] HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Praha : MM publishing, s.r.o., 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

[35] VASILKO, K. Obrábanie titánu a jeho zliatin. Prešov: COFIN Prešov s.r.o., 2001. 120 s. ISBN 80-7099-683-8.

Zoznam obrázkov

Obr. 1.1 Prehľad rozdelenia obrábaných materiálov do skupín podľa ISO 513 [6].....	- 12 -
Obr. 2.1 Schéma súbežného frézovania [6]	- 16 -
Obr. 2.2 Schéma nesúbežného frézovania [6].....	- 17 -
Obr. 2.3 HCS obrábanie titánovej zliatiny [10]	- 20 -
Obr. 2.4 Príklad prívodu reznej kvapaliny frézovacím nástrojom CoroMill 690[11].....	- 21 -
Obr. 2.5 Frézy vhodné pre HFC od firmy SANDVIK Coromant [13].....	- 22 -
Obr. 2.6 Povlak TiAlN po troch metroch v rezu.....	- 25 -
Obr. 2.7 Geometria monolitných fréz	- 28 -
Obr. 2.8 Schéma reznej geometrie u kruhovej doštičky [11].....	- 28 -
Obr. 2.9 Závislosť opotrebovania na čase pri rôznych rýchlostiach [25]	- 30 -
Obr. 2.10 Zlogaritmovaný graf $T-v_c$	- 31 -
Obr. 2.11 Najčastejšie mechanizmy opotrebovania nástroja [20]	- 32 -
Obr. 2.12 Schématicke znázornenie vzniku adhézneho opotrebovania.....	- 33 -
Obr. 2.13 Formy opotrebovania nástroja a ich značenie [27].....	- 34 -
Obr. 2.14 Opotrebovanie chrbtovej plochy rezného klina [29]	- 35 -
Obr. 2.15 Opotrebovanie čelnej plochy rezného klina v tvare žliabku [29]	- 36 -
Obr. 2.16 Plastická deformácia rezného klina [29].....	- 36 -
Obr. 2.17 Nárastok na reznom klíne [13].....	- 37 -
Obr. 2.18 Nárastok [29]	- 37 -
Obr. 3.1 CNC frézovacie centrum DMU 50 [31]	- 39 -
Obr. 3.2 Fréza 5W7G052R00 od firmy Ingersoll Cutting Tools [32].....	- 39 -
Obr. 3.3 RHKW 1003MOTN IN2035 od firmy Ingersoll Cutting Tools [33]..	- 40 -
Obr. 3.4 Prípravok na meranie opotrebovania VBD.....	- 41 -

Obr. 3.5 Upevnenie obrobku k lôžku obrábacieho stroja DMU 50	- 41 -
Obr. 3.6 Náčrt výpočtu efektívneho priemeru (Def.).....	- 43 -
Obr. 3.7 Schéma postupu merania trvanlivosti v závislosti na parametroch frézovania.....	- 45 -
Obr. 3.8 Laboratórna zostava pre meranie opotrebenia nástrojov	- 46 -
Obr. 3.9 Meranie opotrebenia na chrbte nástroja.....	- 46 -
Obr. 3.10 Opotrebenie VBD pri frézovaní s posuvom $f_z = 0,25$ mm po druhom prejazde	- 67 -
Obr. 3.11 Opotrebenie VBD pri frézovaní s posuvom $f_z = 0,4$ mm po druhom prejazde	- 67 -

Zoznam tabuliek

Tab. 1.1 Chemické zloženie titánovej zliatiny Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo [3].....	- 12 -
Tab. 1.2 Mechanické vlastnosti titánovej zliatiny UNS R56260 [3]	- 12 -
Tab. 2.1 Rezné rýchlosti pri HSC z hľadiska materiálov a obrábacej operácie[34]	- 18 -
Tab. 2.2 Vlastnosti vybraných povlakov [19].....	- 24 -
Tab. 3.1 Vybrane parametre stroja DMU 50 [31].....	- 38 -
Tab. 3.2 Parametre frézy 5W7G052R00 od firmy Ingersoll Cutting Tools [32]-	40 -
Tab. 3.3 Vlastnosti RHKW 1003MOTN IN2035 od firmy Ingersoll Cutting Tools [33].....	- 40 -
Tab. 3.4 Rezné podmienky pri čelnom frézovaní titánovej zliatiny	- 42 -
Tab. 3.5 Priebeh opotrebovania nástroja pri nesúbežnom frézovaní($v_c = 50$ $m \cdot min^{-1}$).....	- 47 -
Tab. 3.6 Priebeh opotrebovania nástroja pri nesúbežnom frézovaní($v_c = 50$ $m \cdot min^{-1}$).....	- 48 -
Tab. 3.7 Priebeh opotrebovania nástroja pri nesúbežne frézovaní($v_c = 80$ $m \cdot min^{-1}$).....	- 50 -
Tab. 3.8 Priebeh opotrebovania nástroja pri nesúbežnom frézovaní($v_c = 80$ $m \cdot min^{-1}$).....	- 51 -
Tab. 3.9 Priebeh opotrebovania nástroja pri nesúbežnom frézovaní($v_c = 100$ $m \cdot min^{-1}$).....	- 53 -
Tab. 3.10 Priebeh opotrebovania nástroja pri nesúbežnom frézovaní($v_c = 100$ $m \cdot min^{-1}$).....	- 54 -
Tab. 3.11 Priebeh opotrebovania nástroja pri súbežnom frézovaní($v_c = 50$ $m \cdot min^{-1}$).....	- 56 -
Tab. 3.12 Priebeh opotrebovania nástroja pri súbežnom frézovaní($v_c = 50$ $m \cdot min^{-1}$).....	- 57 -

Tab. 3.13 Priebeh opotrebovania nástroja pri súbežnom frézovaní($v_c = 80$ $m \cdot min^{-1}$).....	- 59 -
Tab. 3.14 Priebeh opotrebovania nástroja pri súbežnom frézovaní($v_c = 80$ $m \cdot min^{-1}$).....	- 60 -
Tab. 3.15 Priebeh opotrebovania nástroja pri súbežnom frézovaní($v_c = 80$ $m \cdot min^{-1}$).....	- 61 -
Tab. 3.16 Priebeh opotrebovania nástroja pri súbežnom frézovaní($v_c = 100$ $m \cdot min^{-1}$).....	- 63 -
Tab. 3.17 Priebeh opotrebovania nástroja pri súbežnom frézovaní($v_c = 100$ $m \cdot min^{-1}$).....	- 64 -
Tab. 3.18 Priebeh opotrebovania nástroja pri súbežnom frézovaní($v_c = 100$ $m \cdot min^{-1}$).....	- 65 -
Tab. 3.19 Zhrnutie hodnôt trvanlivosti a objemu odobratého mat. pri nesúbežnom frézovaní.....	- 67 -
Tab. 3.20 Zhrnutie hodnôt trvanlivosti a objemu odobratého mat. pri súbežnom frézovaní.....	- 68 -
Tab. 3.21 Výsledne konštanty C_T, C_V a exponentu	- 73 -

Zoznam grafov

Graf. 3.1 Priebeh opotrebenia nástroja pri rôznych posuvoch.....	- 49 -
Graf. 3.2 Priebeh opotrebenia pri reznej rýchlosti $v_c=80\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	- 52 -
Graf. 3.3 Priebeh opotrebenia pri reznej rýchlosti $v_c=100\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	- 55 -
Graf. 3.4 Priebeh opotrebenia pri reznej rýchlosti $v_c=50\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	- 58 -
Graf. 3.5 Priebeh opotrebenia pri reznej rýchlosti $v_c=80\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	- 62 -
Graf. 3.6 Priebeh opotrebenia pri reznej rýchlosti $v_c = 100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$	- 66 -
Graf. 3.7 Objem odobraného materiálu	- 68 -
Graf. 3.8 Hodnoty trvanlivosti	- 69 -
Graf. 3.9 Porovnanie parametrov drsnosti Ra a Rz pri nesúbežnom frézovaní..	- 70 -
Graf. 3.10 Porovnanie parametrov drsnosti Ra a Rz pri súbežnom frézovaní....	- 71 -
Graf. 3.11 T- v_c diagram v logaritmických súradniciach.....	- 72 -