

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T004 Strojírenská technologie - technologie
obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Trvanlivost řezných nástrojů při obrábění velmi tvrdých a pevných
materiálů

Autor: **Bc. Tomáš BAKŠA**

Vedoucí práce: **Ing. Miroslav ZETEK PhD.**

Akademický rok 2013/2014

Zadání diplomové práce

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Tato diplomová práce vznikla za podpory GA ZČU při řešení projektu SGS-031-2013 s názvem „Výzkum a vývoj pro inovace v oboru strojírenská technologie – technologie obrábění“.

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce, panu Ing. Miroslavu Zetkovi, PhD. za odborné vedení a cenné rady při zpracování diplomové práce.

Velké díky patří mému konzultantovi Ing. Vojtěchu Švarcovi za veškerou pomoc při řešení a zpracování diplomové práce a cenné rady. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Pavlu Kožmínovi, PhD. za odborné konzultace. Poděkování patří také obsluze stroje Oldřichu Pavelkovi za jeho pomoc a ochotu.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině za velkou podporu v průběhu celého studia.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. BAKŠA	Jméno Tomáš	
STUDIJNÍ OBOR	2303T004 „Strojírenská technologie-technologie obrábění“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zetek, PhD.	Jméno Miroslav	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Trvanlivost řezných nástrojů při obrábění velmi tvrdých a pevných materiálů		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2014
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	67	TEXTOVÁ ČÁST	46	GRAFICKÁ ČÁST	21
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Tato práce se zabývá problematikou obrábění tvrdých ocelí monolitními frézami ze slinutých karbidů. Cílem práce je porovnat několik odlišných frézovacích nástrojů z hlediska jejich trvanlivosti při obrábění kalené oceli 19 436. Výsledky práce poslouží k dalšímu výzkumu a vývoji nástrojů v oblasti obrábění tvrdých ocelí.
KLÍČOVÁ SLOVA	kalená ocel, tvrdé obrábění, monolitní frézy, trvanlivost, obvodové frézování

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Bc. BAKŠA		Name Tomáš	
FIELD OF STUDY	2303T004 „Manufacturing Processes - Technology of Metal Cutting“			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zetek, PhD.		Name Miroslav	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	Durability of cutting tools during machining of very hard and solid materials			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Cutting technology	SUBMITTED IN	2014
----------------	------------------------	-------------------	--------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	67	TEXT PART	46	GRAPHICAL PART	21
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This thesis deals with the machining of hardened steel with carbide endmills. The main task is to compare durability of several different endmills during machining of hardened tool steel 19 436. The results of this work will be used for other research and development of tools for hard machining.
KEY WORDS	hardened steel, hard machining, carbide end mill, durability, countour milling

Obsah

SEZNAM ZNAČEK VELIČIN, SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
1 ÚVOD	12
2 ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU	13
2.1 OBROBITELNOST	13
2.1.1 Řezivost nástroje	14
2.1.2 Zkoušky obrobitelnosti [1,5,6]	15
2.2 TĚŽKOOBROBITELNÉ MATERIÁLY	17
2.2.1 Nástrojové oceli	18
2.3 NÁSTROJE NA OBRÁBĚNÍ OCELÍ O VYŠŠÍ TVRDOSTI	19
2.3.1 HSC obrábění tvrdých ocelí	20
2.3.2 Materiál nástroje	21
2.3.3 Geometrie nástroje a konstrukční provedení	23
2.3.4 Mikrogeometrie nástroje	25
2.3.5 Depozice tenké vrstvy	27
2.3.6 Příklady nástrojů	30
3 NÁVRH A REALIZACE EXPERIMENTU	33
3.1 NÁSTROJE A OBRÁBĚNÝ MATERIÁL	33
3.1.1 Nástroje	33
3.1.2 Materiál	34
3.2 STRATEGIE A PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ	34
3.3 PRE-EXPERIMENT	35
3.4 KRÁTKODOBÁ ZKOUŠKA DLE A. S. KONDRATOVA	37
3.4.1 Nástroj A	37
3.4.2 Nástroj B	39
3.4.3 Nástroj C	41
3.4.4 Nástroj D	42
3.4.5 Výsledky krátkodobé zkoušky	44
3.5 DLOUHODOBÁ ZKOUŠKA	45
3.5.1 Nástroj A	46
3.5.2 Nástroj B	47
3.5.3 Nástroj C	49

3.5.4	Nástroj D	52
4	SUMARIZACE A VYHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ	54
4.1	KRÁTKODOBÁ ZKOUŠKA	54
4.2	DLOUHODOBÁ ZKOUŠKA	55
4.3	EKONOMICKÉ HODNOCENÍ.....	58
4.3.1	Ekonomické hodnocení krátkodobé zkoušky.....	58
4.3.2	Ekonomické hodnocení dlouhodobé zkoušky.....	59
5	ZÁVĚR.....	60
6	LITERATURA A ZDROJE	61
7	PŘÍLOHY	63
7.1	CHARAKTERISTIKA OBRÁBĚNÉHO MATERIÁLU.....	63
7.2	POUŽITÉ STROJE A ZAŘÍZENÍ.....	64
7.2.1	CNC frézovací centrum MCV 750A.....	64
7.2.2	Dynamometr KISTLER 9225 A	65
7.2.3	Optický mikroskop Multicheck PC500.....	66
7.2.4	Měřicí přístroj Alicona Infinite focus.....	67

Seznam značek veličin, symbolů a zkratek

Značka veličiny, symbol	Jednotka	Popis
a_e	[mm]	šířka odřezávané vrstvy
a_p	[mm]	tloušťka odřezávané vrstvy
c_{vT}	[-]	konstanta Taylorova vztahu
D	[mm]	průměr nástroje
f	[mm]	posuv
f_z	[mm/z]	posuv na zub
F	[N]	síla
F_x	[N]	složka řezné síly v ose x
F_y	[N]	složka řezné síly v ose y
F_z	[N]	složka řezné síly v ose z
HRC	[-]	tvrdost ve stupních Rockwella
HV	[-]	tvrdost ve stupních Vickerse
i_o	[-]	index obrobitelnosti
i_R	[-]	index řezivosti
I	[$\mu\text{m}/\text{min}$]	intenzita opotřebení
K	[-]	K faktor
KB	[mm]	opotřebení na čele
KT	[mm]	hloubka výmolu na čele
m	[-]	směrnice Taylorovi přímky
Q	[cm^3]	množství odebraného materiálu
r	[μm]	poloměr zaoblení ostří
R_a	[μm]	střední aritmetická hodnota drsnosti
R_t	[μm]	největší hodnota drsnosti
R_v	[μm]	největší hloubka prohlubně profilu
R_z	[μm]	největší výška profilu
s	[m]	ujetá dráha nástroje
S_α	[μm]	velikost zaoblení na hřbetě
S_γ	[μm]	velikost zaoblení na čele
t	[min]	čas opotřebení
t_{celk}	[min]	celkový čas obrábění
T	[min]	trvanlivost
T_0	[min]	čas prvotního opotřebení
$T_{0,1}$	[min]	trvanlivost při opotřebení 0,1 mm
ΔT	[min]	přírůstek času řezání

T_K	[min]	konečný čas obrábění
v_{15}	[min]	řezná rychlost pro trvanlivost 15 min
v_c	[m/min]	řezná rychlost
v_{c0}	[m/min]	řezná rychlost při prvotním opotřebení
v_{cT}	[m/min]	řezná rychlost odpovídající trvanlivosti
VB_0	[mm]	prvotní opotřebení
ΔVB	[μ m]	přírůstek opotřebení
VB_B	[mm]	opotřebení na hřbetě břitu
VB_{krit}	[mm]	kriteriální opotřebení na hřbetě
VB_{opt}	[mm]	optimální opotřebení na hřbetě
$VB_{stř}$	[mm]	střední hodnota opotřebení na hřbetě
z	[-]	počet břitů nástroje
β	[°]	úhel břitu nástroje
γ	[°]	úhel čela

Zkratka	Popis
Al	hliník
AlCrN	hliník-chrom nitrid
Al ₂ O ₃	oxid hlinitý
AlTiN	hliník-titan nitrid
C	uhlík
CBN	kubický nitrid bóru
Co	kobalt
Cr	chrom
CrAlSiN	chrom-hliník-křemík nitrid
Cr ₃ C ₂	karbid chromu
CrCo	chrom-kobalt
Cu	měď
CVD	metoda chemické depozice („Chemical Vapour Deposition“)
ČSN	česká státní norma
DIN	německá norma
HFM	vysokoposuvové obrábění („high feed machining“)
HPC	vysokovýkonné obrábění („high performance cutting“)
HSC	vysokorychlostní obrábění („high speed cutting“)
HSM	vysokorychlostní obrábění („high speed machining“)
HSS	rychlořezná ocel („high speed steel“)
ISO	mezinárodní norma
Mn	mangan
Mo	molybden
NbC	karbid niobu
Ni	nikl
P	fosfor
PKD	polykrystalický diamant
PKNB	polykrystalický kubický nitrid bóru
PVD	metoda fyzikální depozice („Physical Vapour Deposition“)
RO	rychlořezná ocel
S	síra
Si	křemík
Si ₃ N ₄	nitrid křemičitý
SK	slinutý karbid
TaC	karbid tantalu
TiAlN	titan-hliník nitrid

TiC	karbid titanu
TiN	nitrid titanu
TZ	tepelné zpracování
V	vanad
VBD	vyměnitelné břitové destičky
VC	karbid vanadu
W	wolfram
WC	karbid wolframu

1 Úvod

Tvrdé a pevné materiály se v dnešní době využívají v mnoha strojírenských odvětvích, ať už je to na výrobu řezných nástrojů, tvářecích nástrojů, nebo na výrobu zápusťek a forem. Pokud chceme být při obrábění těchto materiálů produktivní a konkurenceschopní, musí docházet k neustálému snižování nákladů spojených s obráběním a zvyšování kvality obrábění.

Volba vhodného nástroje je v tomto případě jednou z klíčových záležitostí. Jedním z požadavků při volbě nástroje je jeho optimální trvanlivost. Při obrábění tvrdých materiálů musí nástroj odolat velké abrazi, velkému tlaku i teplotě obrábění. Trvanlivost a řezivost nástroje jsou ovlivněny mnoha faktory, jako je např. řezný materiál, geometrie nástroje, mikrogeometrie nebo deponovaná tenká vrstva. Pokud chceme dosáhnout vysoké produktivity a hospodárnosti, je nutné se zaměřit na všechny tyto faktory.

V současné době nabývá na významu vliv deponované tenké vrstvy, která může hrát zásadní roli v konečné trvanlivosti nástroje. Deponovaná tenká vrstva dokáže zvýšit tvrdost povrchu nástroje, snížit koeficient tření a chránit břit před teplem vznikajícím při obrábění. Důležitá je správná volba deponované vrstvy, ale také samotný proces nanášení vrstvy, včetně úpravy mikrogeometrie před a po depozici.

Při obrábění tvrdých materiálů je nutné zvolit správné řezné podmínky, které budou přizpůsobeny specifickým vlastnostem materiálu a zároveň budou využívat potenciál nástroje. Správné řezné podmínky ovlivňují i hospodárnost úběru a kvalitu obrobeného povrchu. Kvalita obrobeného povrchu může být velmi často rozhodujícím požadavkem, který by neměl být opomenut. Nástroj, který má vysokou trvanlivost, ale nedokáže dosáhnout požadované kvality povrchu je ve výsledku neekonomický a tedy i neproduktivní.

Cílem této práce je porovnání několika monolitních frézovacích nástrojů z hlediska trvanlivosti při obrábění kalené oceli ČSN 19 436 s tvrdostí 62 HRC. Nástroje se od sebe mohou lišit svojí geometrií, deponovanou vrstvou i substrátem slinutého karbidu. Hlavním úkolem je tedy porovnání nástrojů z komplexního pohledu. Dosažené výsledky budou dále použity při dalším výzkumu a vývoji nástrojů v oblasti obrábění tvrdých materiálů.

2 Rozbor současného stavu

2.1 Obrobitelnost [1,2,4]

Obrobitelnost, jako technologická vlastnost materiálu, lze definovat mnoha různými způsoby. Jedna z definic popisuje obrobitelnost, jako technologickou charakteristiku vyjadřující souhrnný vliv fyzikálních, mechanických a chemických vlastností obráběných materiálů na průběh a na ekonomické resp. kvalitativní výsledky procesu řezání. Technologie obrábění popisuje obrobitelnost také například jako míru schopnosti určitého materiálu se nechat efektivně obrobit řezným procesem. Vzhledem k tomu, že se jedná o relativní pojem, nemůže být obrobitelnost jednoznačně definována a posuzuje se na principu porovnávání zkoušeného a srovnávacího materiálu. V úvahu se musí brát jak vlastnosti obráběného materiálu, tak vlastnosti řezného nástroje a řezné podmínky. Pro vyhodnocení obrobitelnosti se jednotlivé materiály rozdělují do tzv. skupin obrobitelnosti:

a - litiny

b - oceli

c - těžké neželezné kovy (Cu a slitiny Cu)

d - lehké neželezné kovy (Al a slitiny Al)

e - plastické hmoty

f - přírodní nerostné hmoty

g - vrstvené hmoty

h - pryž

v - tvrzené litiny pro výrobu válců

Jednotlivé skupiny materiálu se dále dělí do tříd obrobitelnosti dle indexu obrobitelnosti i_o . Index je vyjádřen číslem (bezrozměrným) a ukazuje poměr velikosti určité veličiny vztahující se ke zkoumanému materiálu a velikosti téže veličiny vztahující se k srovnávacímu materiálu (tzv. etalonu). V praxi se tedy obrobitelnost určuje nepřímo, většinou podle opotřebení nástroje, ale i podle dalších charakteristik, jako je velikost řezné síly, tvar vzniklých třísek, jakosti obrobeného povrchu, atd. Vztah pro index obrobitelnosti může být například:

$$i_o = \frac{v_{CT} \text{ zkoumaného materiálu}}{v_{CT} \text{ etalonového materiálu}} [-]$$

a vyjadřuje poměr velikosti určité veličiny obráběného materiálu k velikosti veličiny odpovídajícího etalonového materiálu. Nejčastější používanou veličinou (kritériem) je v_{CT} , což je řezná rychlost odpovídající určité stanovené trvanlivosti nástroje T. Trvanlivost je dána intenzitou opotřebení břitu nástroje. Index obrobitelnosti etalonového materiálu je logicky roven 1.

Obrobitelnost materiálu je závislá na mnoha faktorech, z nichž nejdůležitější jsou:

- chemické složení obráběného materiálu (obsah uhlíku, legující přísady)
- struktura obráběného materiálu (tepelné zpracování, tváření za studena, mikrostruktura)
- mechanické a fyzikální vlastnosti obráběného materiálu (tvrdost, houževnatost, atd.)
- způsob (metoda) obrábění (soustružení, frézování, vrtání, atd.)
- materiál a vlastnosti řezného nástroje (tvrdost za vysokých teplot, odolnost vůči opotřebení, chemická stabilita)

Katedra Technologie Obrábění

Bc. Tomáš Bakša

- geometrie řezného nástroje (úhel čela, úhel hřbetu, zaoblení břitu, atd.)
- řezné podmínky (řezná rychlost, rychlost posuvu, tloušťka odřezávané vrstvy)
- řezné prostředí (procesní kapalina, obrábění za sucha)

V závislosti na faktorech a dalších ovlivňujících činitelích, může být obráběný materiál vyhodnocen jako dobře obrobitelný, nebo špatně obrobitelný. Pokud má třída obrobitelnosti (a tedy i index obrobitelnosti) obráběného materiálu vyšší číslo než třída obrobitelnosti etalonového materiálu, je obráběný materiál považován za lépe obrobitelný. Jestliže je jeho třída (index) obrobitelnosti nižší než třída etalonového materiálu, je považován za hůře obrobitelný.

Kritéria obrobitelnosti:

- intenzita opotřebení břitu řezného nástroje
- teplota řezného procesu
- řezné síly a momenty
- spotřeba práce při řezání
- tvar vznikající třísky a její odvádění z místa řezu
- kvalita obrobeného povrchu
- další kritéria

2.1.1 Řezivost nástroje [4,5]

S obrobitelností je úzce spjat pojem řezivost nástroje. Na rozdíl od obrobitelnosti, která vyjadřuje technologickou vlastnost obráběného materiálu, vyjadřuje řezivost souhrn vlastností materiálu, ze kterého je vyroben nástroj (nástrojového materiálu). Tyto vlastnosti nám říkají, jaké má daný materiál nástroje řezné schopnosti, které mají vliv na hospodárnost úběru materiálu. Jedna z definic říká, že „řezivost nástroje vyjadřuje schopnost materiálu břitu nástroje obrábět obrobek za daných technologických podmínek“ [4]. Je to tedy funkce nástroje, která je závislá na řezných podmínkách. Řezivost nástroje musí splňovat následující parametry:

- geometrická a rozměrová přesnost obrobku
- kvalita obrobeného povrchu
- velikost složek řezných sil
- velikost teploty řezání

Na nástrojový materiál jsou kladeny požadavky, aby byla zajištěna produktivita řezného procesu. Základním požadavkem je, aby tvrdost nástrojového materiálu byla o 5 a více HRC vyšší než tvrdost obráběného materiálu. Nástroj musí mít také vyhovující pevnost v ohybu a tlaku. Materiál nástroje musí být dostatečně tepelně vodivý, a při vysokých teplotách musí být zachována stálost jeho vlastností.

Stejně jako obrobitelnost je řezivost relativní pojem a pro její stanovení se provádí rozsáhlé výzkumy, kde je hlavním úkolem určit poměrnou odolnost vůči opotřebení zkoumaného nástrojového materiálu v porovnání s jiným nástrojovým materiálem, při obrábění určitého materiálu. Dalším úkolem je pro daný nástrojový materiál určit oblast racionálních řezných podmínek.

Kritéria řezivosti se do velké míry shodují s kritérii obrobitelnosti. Hlavním kritériem řezivosti je tedy intenzita opotřebení břitu při konkrétních řezných podmínkách. Řezivost i obrobitelnost lze rozdělit na absolutní a relativní.

Katedra Technologie Obrábění

Bc. Tomáš Bakša

Absolutní řezivost (obrobitelnost) je „charakterizována buď funkčním vztahem a parametry spolu souvisejícími nebo určitou velikostí dané veličiny charakterizující obrobitelnost, resp. řezivost“ [5].

Relativní řezivost (obrobitelnost) je „charakterizována bezrozměrnými čísly, které udávají poměr velikostí určité veličiny vztahující se k danému materiálu obrobku, resp. k nástroji (hodnocenému) a velikosti této veličiny odpovídajícímu etalonovému (referenčnímu) materiálu obrobku, resp. nástroje“ [5].

V praxi se řezivost nástroje porovnává s řezivostí druhého nástroje při daných řezných podmínkách a určuje se tzv. index řezivosti i_R . Vztah pro index řezivosti má stejný tvar jako index obrobitelnosti.

$$i_R = \frac{v_{cT} \text{ zkoumaného materiálu}}{v_{cT} \text{ etalonového materiálu}} [-],$$

kde v_{cT} je řezná rychlost při určité trvanlivosti T . Hlavním funkčním vztahem pro stanovení absolutní řezivosti je tzv. komplexní Taylorův vztah. Pro absolutní řezivost se však používá i zjednodušený Taylorův vztah, který není tak složitý, nebo řezná rychlost v_{cT} při stanovené trvanlivosti břitu T .

„Trvanlivost břitu T je dána časem řezání v minutách, po který je břit schopen obrábět od nového stavu (naostření) až do stavu otupení.“[7] Je zřejmé, že trvanlivost je závislá na obrobitelnosti obráběného materiálu, řezivosti řezného materiálu a na mnoha dalších faktorech (geometrie, řezné podmínky, prostředí, atd.), které udržují všechny tyto pojmy ve vzájemných souvislostech. V praxi je snaha dosáhnout optimální trvanlivosti nástroje.

2.1.2 Zkoušky obrobitelnosti [1,5,6]

Způsobů zjištění obrobitelnosti materiálů je více a jejich volba závisí na požadované přesnosti, objektivitě a rychlosti zkoušení. V základě se zkoušky obrobitelnosti rozdělují na dva druhy - krátkodobé a dlouhodobé zkoušky obrobitelnosti. Každá z těchto druhů zkoušek má své výhody a nevýhody.

2.1.2.1 Krátkodobé zkoušky obrobitelnosti [1,6]

Největší výhodou krátkodobých zkoušek, jak už z názvu vyplývá, je jejich krátká doba trvání. Zároveň se při této zkoušce spotřebuje méně materiálu a tím se zmenší náklady na provedení. Slouží tedy pro rychlé stanovení obrobitelnosti, při dostatečné přesnosti, a používá se u třískového obrábění s danou geometrií nástroje. Jejich nevýhodou je menší objektivita při zkoušení a jejich obtížné porovnání s ostatními typy zkoušek.

Krátkodobé zkoušky jsou vhodné pro rozřídění skupin materiálů podle jejich stupně obrobitelnosti, dále pro ověření stupně obrobitelnosti u jednotlivých dodávek materiálu stejného druhu, popřípadě pro možné změny stupně obrobitelnosti materiálů. Metody krátkodobých zkoušek se dále rozdělují podle principu a použitého kritéria na metody přímé a nepřímé.

Metody přímé vycházejí z přímého zjišťování intenzity opotřebení břitu za upravených smluvních podmínek, zatímco metody nepřímé vycházejí z předpokládaného nebo známého vztahu mezi opotřebením břitu nástroje a parametry charakterizujícími řezný proces. Nepřímé metody jsou založeny především na zjišťování energetických parametrů. Jednotlivé metody přímých a nepřímých zkoušek jsou uvedeny v tab. 2-1.

Přímé metody zjišťování obrobiteľnosti	Nepřímé metody zjišťování obrobiteľnosti
Čelní krátkodobá zkouška	Dynamická metoda (měření sil při obrábění)
Mikrozkouška trvanlivosti	Měření tvrdosti obrobku
Snížení míry opotřebení	Mikrometrická metoda (při stejné drsnosti)
Použití nástroje se sníženou řezivostí	Porovnání tvaru třísky
Zvýšení řezné rychlosti	Leyensetterova metoda
	Vrtání při konstantním tlaku
	Pomocí teploty řezání
	Měření hloubky zpevněné vrstvy

Tab. 2-1: Metody zjišťování obrobiteľnosti

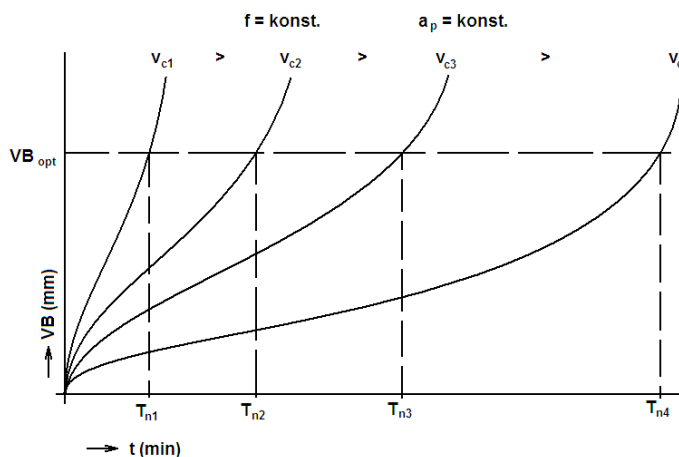
2.1.2.2 Dlouhodobé zkoušky obrobiteľnosti [5,1]

Předností dlouhodobé zkoušky je její vysoká objektivita výsledků a na jejím základě je možné posoudit i míru objektivity ostatních zkoušek. Na rozdíl však od krátkodobých zkoušek, které probíhají za podmínek se zvýšenou intenzitou obrábění, se dlouhodobé zkoušky provádí za běžných (reálných) podmínek. To způsobuje vyšší časovou náročnost a spotřebu materiálu, což značně zvyšuje náklady na provedení zkoušky.

Existuje v podstatě jen jedna dlouhodobá zkouška trvanlivosti, kde je jako hlavní parametr hodnota řezné rychlosti. Zkouška se provádí buď soustružením, nebo frézováním, a to za smluvených řezných parametrů. Dohodnutými parametry jsou: druh řezného nástroje, geometrie nástroje, materiál nástroje, posuv, hloubka řezu v axiálním a radiálním směru. Zkouška se provádí při různých řezných rychlostech až do optimálního otupení břitu.

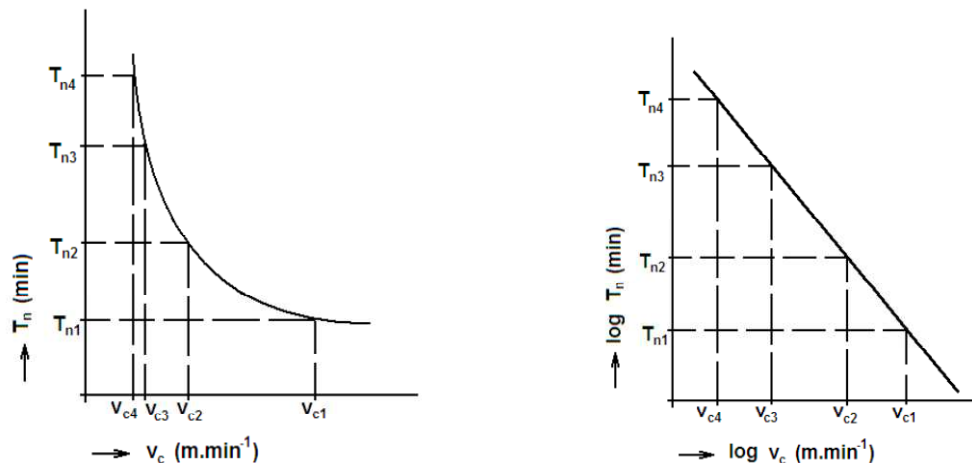
Dlouhodobá zkouška trvanlivosti má následující průběh:

- 1) Změření časového průběhu opotřebení pro dané kritérium opotřebení (např. opotřebení na hřbetě nástroje VB_B) při různých hodnotách řezné rychlosti a současně při konstantních řezných parametrech. Průběh je zobrazen v grafu, kde se sestaví křivky otupení (obr. 2-1).



Obr. 2-1: Průběh opotřebení při různých řezných rychlostech [5]

- 2) Určení kritéria opotřebení VB_{opt} (popř. VB_{Nopt} , KT_{opt} , KB_{opt} a další) a stanovení odpovídající trvanlivosti T pro každou řeznou rychlost v_c (Obr. 2-1).
- 3) Sestrojení závislosti trvanlivosti nástroje na řezné rychlosti ($T_n = f(v_c)$) v logaritmických souřadnicích. Následně je možné určit index obrobitelnosti i_o porovnáním řezných rychlostí zkoumaného a etalonového materiálu (obr. 2-2).



Obr. 2-2: Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti [5]

2.2 Těžkoobrobitelné materiály [3,10,11]

Existují různé druhy těžkoobrobitelných materiálů, mezi které patří i oceli o vyšší tvrdosti. Vlivem stále častějšího používání těchto materiálů v praxi (letecký průmysl, automobilový průmysl, lékařský průmysl, vodní průmysl, výroba forem a zápustek, atd.) je nutné se zabývat studiem těžkoobrobitelných materiálů, a vyvíjet nové možnosti pro jejich obrábění.

Některé těžkoobrobitelné materiály způsobují vznik nárůstku na nástroji a mají tendenci se zpevňovat během řezného procesu. Vysoká tvrdost kalených ocelí má za následek zhoršenou obrobitelnost materiálu. Zhoršená obrobitelnost způsobuje namáhání nástroje (velké řezné síly, vysoké teploty) a následně jeho opotřebení. Nástroj musí odolávat plastické deformaci, abrazi, oxidaci, a musí být chemicky stabilní.

Vysoké tvrdosti ocelí se dosáhne tepelným zpracováním - kalením. Kalitelnost ocelí je závislá na obsahu uhlíku, kdy oceli s vyšším obsahem lze zakalit na větší tvrdost. Podle standardů ISO se tvrdé oceli řadí do skupiny s označením H, kam patří rovněž i tvrdé litiny. Tvrdost této skupiny se pohybuje v rozmezí 45 až 65 HRC. Obecně lze říct, že každá ocel s tvrdostí nad 50 HRC patří mezi tvrdé oceli. Třídy ocelí schopné dosáhnout této tvrdosti jsou 15, 16 a 17. Nejvyšší tvrdosti však dosahují nástrojové oceli třídy 19.

Vzniklá martenzitická struktura po kalení je velmi tvrdá, ale vzniká rovněž vysoké vnitřní napětí. Po kalení následuje popouštění oceli, které se skládá z ohřevu na teplotu pod A_{c1} , výdrži na této teplotě po určitou dobu a následného ochlazení. Kromě chemického složení, je tvrdost po kalení závislá hlavně na kalící teplotě, popouštěcí teplotě, rychlosti ochlazování a velikosti obsahu zbytkového austenitu. Zbytkový austenit lze omezit vhodnými podmínkami ochlazování, velikostí austenitického zrna a přísadovými prvky. Za zakalenou strukturu se obecně považuje taková, která obsahuje minimálně 50% martenzitu. „Typickými příklady

Katedra Technologie Obrábění

Bc. Tomáš Bakša

použití kalené oceli jsou hřídele, vodící plochy, vačky, ozubená kola a kotouče z konstrukční uhlíkové oceli, u kterých je tvrdost po kalení 50 až 60 HRC.“ [11]

V dřívějších dobách se těžkoobrobitelné a tvrdé materiály obráběly neproduktivně elektrojiskrovým obráběním nebo broušením. V dnešní době je snaha nahradit drahé způsoby obrábění produktivnějším frézováním.

2.2.1 Nástrojové oceli [3,11,12]

Nástrojové oceli jsou podle ČSN 42 0002 označovány jako oceli třídy 19. V praxi je lze rozdělit do tří skupin:

- Nástrojové oceli uhlíkové
- Nástrojové oceli slitinové legované
- Nástrojové oceli slitinové rychlořezné (HSS)

Nástrojové oceli uhlíkové jsou méně prokalitelné a více houževnaté. Obsah uhlíku se liší podle použití oceli. Jsou vhodné pro nástroje na stříhání oceli, pilníky, nástroje na obrábění dřeva a na nástroje pracující rázem, jako jsou kladiva a pneumatické nářadí. Jejich nevýhodou je poměrně rychlý pokles tvrdosti vlivem popouštění při ohřevu.

Nástrojové oceli slitinové legované jsou vhodné pro více namáhané nástroje. Hlavními legujícími prvky jsou V, Cr, W, Mo, Si, Mn a Ni. Přidáním karbidotvorných prvků lze zvýšit trvanlivost řezných nástrojů. Legující prvky usnadňují kalení a zabraňují vzniku trhlin. Tyto oceli se používají například na nože na stříhání tlustých plechů, u měřících nástrojů, nástrojů pro tažení a ražení, nástrojů pracujících za tepla, jako jsou zápustky, a na formy k lití pod tlakem.

Nástrojové oceli slitinové rychlořezné mají dobrou odolnost proti popouštění vlivem tepla, které vzniká při řezání. Použití rychlořezné oceli umožňuje zvýšit řeznou rychlost a tím i produktivitu obrábění. Hlavním přísadovým prvkem je W, který zvyšuje řezivost nástroje, chrom, zvyšující kalitelnost, a vanad, který zvyšuje odolnost proti popouštění a opotřebení. Pro zabránění přehřátí při ohřevu na vysokou kalící teplotu se do některých ocelí přidává kobalt.

Na obr. 2-3 je zobrazené značení a rozdělení nástrojových ocelí.

19 XYZ. AB

↙

Jakostní skupina
oceli

↘

Stupeň přetváření
Stav ocele (druh tepelného zpracování)

		X	A	B
0		0,3-0,6%C podeutektoidní	Nezpracované	Nezpracované
1	Nelegované	0,5 – 1,1%C	Normal. žháno	Lehce válcováno
2		1,0 – 1,5% nadeutektoidní	Žháno	1/4 tvrdý
3		Mn(+V,Cr,W,Si),V	Žháno na měkko	1/2 tvrdý
4	Legované	Cr,Cr(+V,Si),Cr-Mn-V	Kalení	3/4 tvrdý
5		Cr-Mn,Cr-Mo(+V,Mn,Si)	Normal. žháno a popuštěno	4/4 tvrdý
6		Ni(+V,Cr)	Zušl. na dolní pevnost	5/6 tvrdý
7		W,W-Cr(+V,Ni,Si,Co)	Zušl. na střední pevnost	Neobsazeno
8		Rychlořezné oceli RO	Zušl. na horní pevnost	Spec. zpevněno
9		Lité	Zvláštní TZ	Dle zvl. ujednání

Obr. 2-3: Rozdělení a značení nástrojových ocelí [3]

Tvrdość nástrojové oceli se pohybuje od 50 do 68 HRC (po tepelném zpracování). Mají vysokou pevnost, odolnost vůči otěru a odolnost proti oxidaci. „Z důvodu dosažení co nejčistší struktury, která se používá v tepelně namáhaných aplikacích je tuto ocel možné tavit a znovu přetavit ve vakuu.“ [11]

2.3 Nástroje na obrábění ocelí o vyšší tvrdosti [3,22,23]

Obrábění tvrdých ocelí třískovým způsobem se zpravidla realizuje HSC obráběním. Pro hrubování, nebo i dokončování rovinných ploch se používají čelní válcové frézy. Pokud dokončujeme nějakou tvarovou plochu, používají se především kulové nebo toroidní frézy, u kterých je důležité správné stanovení efektivního průměru. Špatné stanovení efektivního průměru může vést k vysokému silovému namáhání nástroje a k jeho destrukci.

Obrábění tvrdých ocelí je spjato se specifickými problémy, jako je velmi rychlé opotřebení břítu nástroje, tvorba trhlin nebo vydrolování břítu, špatné výsledky (přesnost, kvalita obrobeneho povrchu) obrábění.

Problémy, které vznikají při obrábění tvrdých materiálů:

- Vysoká teplota v místě řezu
- Vyšší proměnlivá velikost řezných sil
- Vysoký tlak na malý průřez třísky v blízkosti ostří
- Rychlé opotřebení břítu nebo vylomení břitové destičky
- Napětí v obrobku během obrábění
- Nedostatečná stabilita

Katedra Technologie Obrábění

Bc. Tomáš Bakša

Pro dosažení produktivního a efektivního obrábění tvrdých ocelí je potřeba zvolit vhodný řezný nástroj. Při volbě nástroje je nutné brát v úvahu všechny faktory nástroje, které ovlivňují řezný proces. Mezi hlavní faktory nástroje, které ovlivňují celý proces obrábění patří:

- Materiál nástroje
- Geometrie nástroje a konstrukční provedení
- Mikrogeometrie nástroje
- Deponovaná tenká vrstva

Požadavky kladené na břit nástroje:

- Odolnost břitu proti působení abrazivního opotřebení
- Chemická stabilita
- Zachování tvrdosti za zvýšených teplot
- Pevnost v tlaku a ohybu
- Odolnost břitu vůči difuznímu opotřebení
- Spolehlivost a houževnatost břitu

2.3.1 HSC obrábění tvrdých ocelí

Obrábění vysokou řeznou rychlostí nám umožňuje dosáhnout vysoké produktivity ve výrobě. Vysoká rychlost obrábění sebou přináší vznik velkého množství tepla, které způsobuje měknutí obráběného materiálu v místě řezu. Tímto způsobem je možné snížit síly vzniklé během řezného procesu a snížit zatížení nástroje i stroje. HSC obrábění se ve většině případech provádí bez použití procesních medií, tzv. suché obrábění. Tuto metodu je možné aplikovat na technologie frézování, soustružení, apod.

Výhody použití vyšší řezné rychlosti:

- Značné zkrácení času obrábění
- Zvýšení rychlosti posuvu (5x až 10x)
- Možnost zvýšení specifického objemu třísek (asi o 30%)
- Možnost snížení řezných sil (o více jak 30%)
- Možnost obrábění součástek s komplikovanou geometrií bez vibrací
- Možnost dokončovacích operací HSC obráběním (dobrá kvalita obrobeného povrchu)

Nevýhody HSC obrábění:

- Zkrácení životnosti nástroje vlivem vysokých řezných rychlostí
- Řezný materiál a deponovaná vrstva musí být přizpůsobeny parametrům
- Nejsou známy dokonalé optimální technologické parametry
- Pro každou součástku musí být vypracována nová strategie obrábění

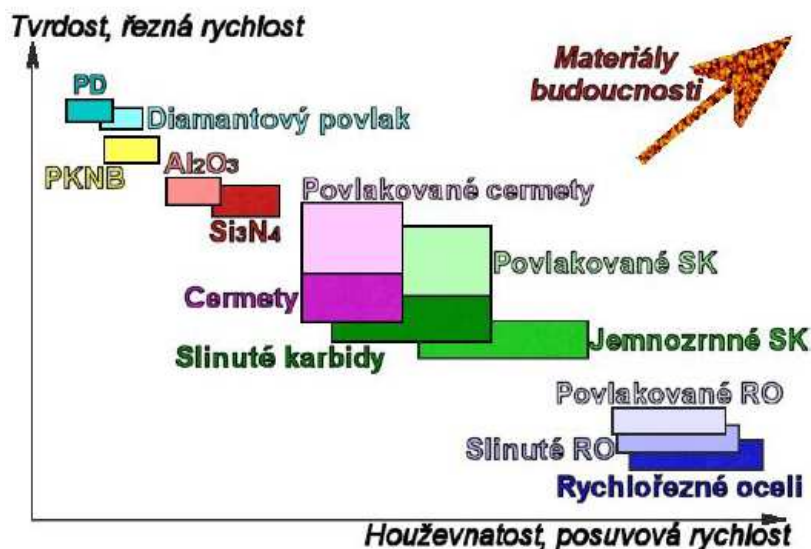
Pro optimální využití HSC technologie je nutno splnit všechny požadavky kladené na celý systém (stroj, nástroj, upnutí nástroje, obrobek). Nástroj musí splňovat především následující předpoklady:

- Vysoká přesnost házivosti
- Vysoká kvalita vyvážení (geometrie, tvar stopky)
- Dlouhá životnost nástroje (speciální geometrie ostří a deponovaná vrstva)
- Velká tuhost nástroje

2.3.2 Materiál nástroje [3,11,23]

S vývojem řezných materiálů, které v dnešní době dosahují vysoké odolnosti proti otěru a vyšší řezivosti, je možné obrábět i ty nejtvrďší materiály třískovým obráběním.

Základní rozdělení řezných materiálů lze vidět na obr. 2-4, kde jsou rozmístěny podle jejich tvrdosti a houževnatosti. Je zřejmé, že nejtvrďší diamant je zároveň nejméně houževnatý. Naopak rychlořezná ocel je nejhouževnatější řezný materiál, ale s nejnižší tvrdostí.



Obr. 2-4: Základní rozdělení řezných materiálů [8]

Obrábění tvrdých materiálů je spjato se zvláštním mechanismem tvoření třísky, kdy nevzniká žádná střižná rovina, ani oblast stříhu. Tvrdé materiály jsou za normálních teplot a tlaku v podstatě neformovatelné. Před čelní plochou povrchu obrobku se v první části oddělování materiálu tvoří trhlinka, která se zvětšuje. Vznikající segmenty se převážně „spékají“. Na řezné materiály pro obrábění tvrdých materiálů jsou kladeny požadavky (tab. 2-2).



Obr. 2-5: Prasklina při oddělování tvrdého materiálu [23]

Namáhání při obrábění tvrdých materiálů	Požadavky na řezné materiály
Vysoký tlak v blízkosti ostří	Odolnost proti difuzi
Vysoké provozní teploty	Houževnatost, pevnost hran
Vysoké rázové zatížení v přerušovaném řezu	Pevnost v ohybu a tlaku

Tab. 2-2: Požadavky na řezný materiál [11]

Z uvedených řezných materiálů nelze na obrábění tvrdých ocelí použít rychlořeznou ocel, protože by nespĺňovala podmínku tvrdosti. Řezný materiál musí být tvrdší než obráběný materiál alespoň o 5 HRC. Takže obrábění kalené oceli rychlořeznou ocelí by bylo značně neefektivní. Z výše uvedených řezných materiálů lze vyloučit i diamant, protože s ním nelze obrábět ocel kvůli vysoké afinitě uhlíku k železu. Řezné materiály vhodné pro obrábění tvrdých ocelí:

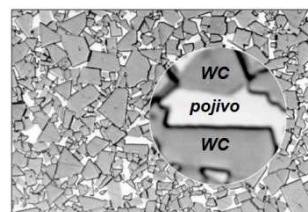
- Kubický nitrid bóru (CBN)
- Řezná keramika
- Slinuté karbidy (SK)

CBN je po diamantu druhý nejtvrdší řezný materiál, ale tomu také odpovídají jeho cenové náklady. Použití CBN pro obrábění tvrdých ocelí závisí na stabilitě řezného procesu a na požadované tvrdosti nástroje. Vzhledem k malé houževnatosti tohoto materiálu, musí být během řezného procesu minimalizovány vibrace, protože by mohlo dojít k poškození nástroje. Vibrace mohou vzniknout například při velkém vyložení nástroje během frézování dutin zápustek či forem. Velikost vibrací je také ovlivněna způsobem najíždění a vyjíždění nástroje z řezu a také samotné dráhy pohybu nástroje.

Podobně je to s použitím řezné keramiky. Řezná keramika dosahuje velké tvrdosti i za vysokých teplot, avšak její houževnatost je nižší v porovnání se slinutým karbidem. Vzhledem k vyšším pořizovacím nákladům CBN a řezné keramiky by bylo ekonomicky výhodné používat tyto nástroje, pokud jsou ideálně naprogramované dráhy nástroje, dostatečně upnutí nástroje a rovnoměrné přídatky na obrábění. V opačném případě by mohly vzniknout vibrace, při kterých by bylo výhodnější použít houževnatější slinutý karbid.

2.3.2.1 Slinuté karbidy [3,13]

„Slinuté karbidy jsou produktem práškové metalurgie. Jsou charakterizovány jako směsí karbidických fází jednotlivých karbidů v kovovém pojivu. Fáze se skládá z velmi tvrdých karbidů kovů s vysokou teplotou tavení: karbid wolframu WC, titanu TiC, tantalu TaC, niobu NbC, chromu Cr₃C₂ někdy i vanadu VC. Pojivem je většinou kobalt Co.“ [13]



Obr. 2-6: Struktura SK [9]

Slinuté karbidy dosahují tvrdosti až 75 HRC, takže je lze použít na obrábění materiálu do 70 HRC, aby byla splněna podmínka tvrdosti. Jak již bylo řečeno, SK je po rychlořezné oceli nejhouževnatější řezný materiál, vhodný i pro dynamické zatížení. Pořizovací náklady slinutých karbidů bývají přijatelné. Nejvyšší podíl SK je při výrobě vyměnitelných břitových destiček (VBD), ale v současnosti roste i podíl využití na monolitní nástroje (vrtáky, frézy). Tlumicí schopnosti SK se využívají i v oblasti držáků.

Vlastnosti SK jsou ovlivněny následujícími činiteli:

- Velikost a typ jednotlivých zrn
- Obsah pojivního kovu (Co)

Katedra Technologie Obrábění

Bc. Tomáš Bakša

- Pórovitost
- Množství a velikost strukturních vad
- Kvalita procesu výroby a vstupních surovin

Velikost a typ jednotlivých zrn zásadně ovlivňuje vlastnosti řezného materiálu. Slinuté karbidy s jemným zrnem mají obecně vyšší tvrdost, pevnost v ohybu a lomovou houževnatost. Výsledkem použití takového karbidu je vyšší řezivost a trvanlivost nástroje (VBD). Práškovou metalurgií lze v dnešní době vyrobit i slinuté karbidy se zrny nanometrických rozměrů. Rozdělení karbidů podle velikosti zrn je v tab. 2-3.

Označení	Velikost zrna [μm]
Nano zrno	< 0,2
Jemné zrno	1,0 - 1,4
Středně jemné zrno	1,4 - 2,5
Střední zrno	2,5 - 4,0
Hrubé zrno	4,0 - 10,0
Extra hrubé zrno	> 10

Tab. 2-3: Velikosti zrn slinutého karbidu [9]

Vyšší obsah Co ve slinutých karbidech snižuje jejich tvrdost a pevnost v tahu, ale zvyšuje houževnatost. Je snaha dosáhnout co nejmenší pórovitosti, protože pórovitost snižuje životnost nástroje.

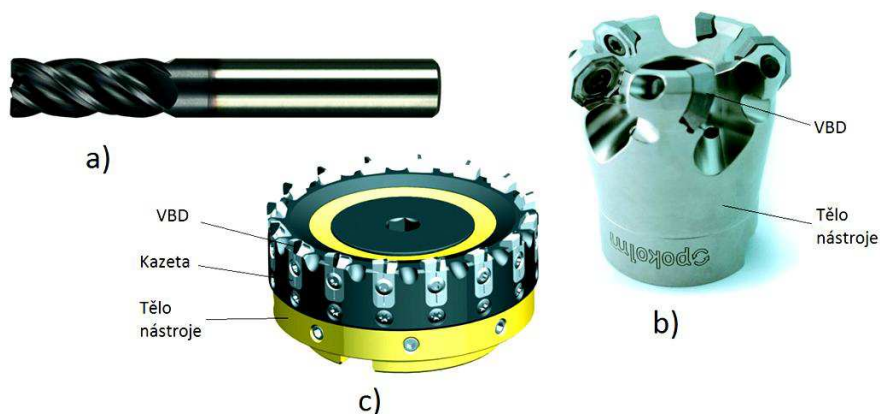
2.3.3 Geometrie nástroje a konstrukční provedení [3,13,11]

Obráběním tvrdých ocelí vznikají tvrdé třísky. V průběhu řezného procesu je nutné zajistit jejich správný odchod z místa řezu, protože třísky by mohly poškodit povrch obrobku a v horším případě i nástroj. Pomocí stlačeného vzduchu vedeného skrz vřeteno je možné zabezpečit správný odchod třísky.

Při obrábění tvrdých ocelí se nedoporučuje chlazení pomocí chladících emulzí, protože by mohlo docházet k tepelným šokům. Tepelné šoky mohou vést ke vzniku mikrotrhlin ve slinutém karbidu a následné destrukci nástroje.

V základě se frézy dle konstrukčního provedení rozdělují na:

- Monolitní frézy (obr. 2-7 a)
- Frézy s VBD (obr. 2-7 b)
- Speciální frézy (obr. 2-7 c)



Obr. 2-7: Základní konstrukce frézovacích nástrojů [13]

Katedra Technologie Obrábění

Bc. Tomáš Bakša

Monolitní frézy se vyrábějí v průměrech 4 až 25 mm. Pro žebrování se však vyrábějí monolitní stopkové frézy i s průměrem od 1,4 mm, které jsou určeny k obrábění materiálů tvrdosti až do 65 HRC.

Frézy s VBD se používají pro větší průměry než monolitní, a to v rozmezí přibližně 6 až 230 mm. Výjimkou však nejsou ani frézovací hlavy pro produktivní čelní frézování s průměrem 500 mm. Velkou výhodou použití VBD je úspora materiálu, což je ekonomicky výhodné. Další důvod použití je technologický, protože s VBD lze dosáhnout tvrdé řezné hrany při zachování houževnatého jádra nástroje.

Mezi speciální frézy patří kazetové frézy, frézy s vyměnitelnými hlavicemi a stavitelné frézy. Výhodou těchto fréz je jejich univerzálnost, protože je možné pro jedno tělo použít určité spektrum geometrií nástroje. S jedním tělem frézy lze tedy obrábět různé druhy materiálů. Nevýhodou je jejich nižší tuhost oproti monolitním nebo VBD frézám.

Při HSC obrábění je velmi důležité zajistit stabilitu řezného procesu, kterou můžeme ovlivnit například konstrukcí nástroje:

- Konstrukční provedení s proměnným tvarem drážky pro odvod třísky
- Proměnnou hloubkou drážky a nerovnoměrnou zubovou roztečí se zabezpečí snadný odvod třísky a omezí se výskyt vibrací
- Přesazeným průměrem se zlepší přístup do místa řezu
- Proměnným tvarem drážky se zajistí maximální stabilita při náročných frézovacích operacích
- Konstrukční provedení s proměnným úhlem stoupaní šroubovice

Obecně platí, že při obrábění tvrdých materiálů je vhodná negativnější geometrie nástroje (tzn. čím vyšší tvrdost, tím negativnější geometrie). Negativnější geometrie nám snižuje tlak na řezné hraně nástroje, protože k prvnímu kontaktu mezi obrobkem a nástrojem dojde mimo tuto hranu. To nám zajišťuje delší životnost nástroje, než při použití pozitivní geometrie.

Použití geometrie s proměnným úhlem stoupaní šroubovice zlepšuje stabilitu řezu a snižuje vznik vibrací. Výsledkem je vyšší životnost nástroje a vyšší kvalita obrobené plochy. Proměnný úhel stoupaní šroubovice nám umožňuje:

- Použít větší hloubku řezu (radiální a axiální) - větší úběr materiálu
- Redukovat vylamování a vyštipování ostří - menší náklady na nový nástroj
- Dosáhnout větší rozměrovou přesnost - méně zmetků

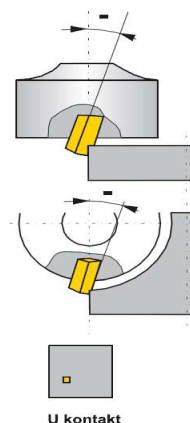
Při obrábění rovinných ploch frézou s VBD se rozlišují tři hlavní druhy geometrií:

- Dvojitá pozitivní geometrie (kladné γ_p , kladné γ_f)
- Dvojitá negativní geometrie (záporné γ_p , záporné γ_f)
- Pozitivně-negativní geometrie (kladné γ_p , záporné γ_f)

γ_p - axiální úhel čela měřený v rovině rovnoběžné s osou rotace nástroje

γ_f - radiální úhel čela měřený v rovině kolmé k ose rotace nástroje

Dvojitá negativní geometrie je vhodná pro obrábění tvrdé oceli a šedé litiny, při kterém vznikají velká mechanická zatížení břitu. Tento typ geometrie má negativní oba úhly čela, a používá se pro něj rovněž negativní VBD (obr. 2-8). Sklonem břítové destičky se získá úhel hřbetu. Výhodou je možnost použití obou stran VBD, čímž se



Obr. 2-8: Dvojitá negativní geometrie VBD [13]

Katedra Technologie Obrábění

Bc. Tomáš Bakša

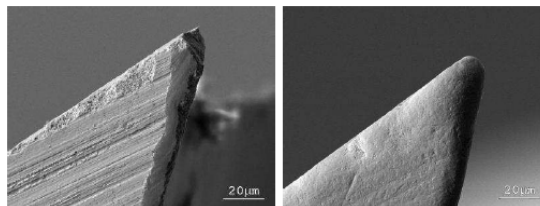
dosáhne většího počtu stabilnějších břitů a větší hospodárnosti výroby. Nevýhodou je vznik velkých řezných sil, pro které je potřeba velký příkon a stabilita stroje. Pro materiály tvořící dlouhou třísku má často nepříznivý vliv na utváření třísky velká tloušťka třísky, vytvářející se díky dlouhé kontaktní ploše břitu a třísky.

2.3.4 Mikrogeometrie nástroje [14,15]

Monolitní frézovací nástroje ze slinutého karbidu se vyrábějí z tyčí ze SK (roubíků), které jsou technologií broušení upraveny do požadovaného geometrického tvaru. Z hlediska geometrie můžeme na nástroji hodnotit jeho makrogeometrii a mikrogeometrii. Makrogeometrie nástroje zahrnuje výchozí profil břitu nástroje a vytvořené nástrojové úhly. Požadovaný profil břitu závisí na materiálu nástroje, použití nástroje, řezném prostředí a dalších parametrech.

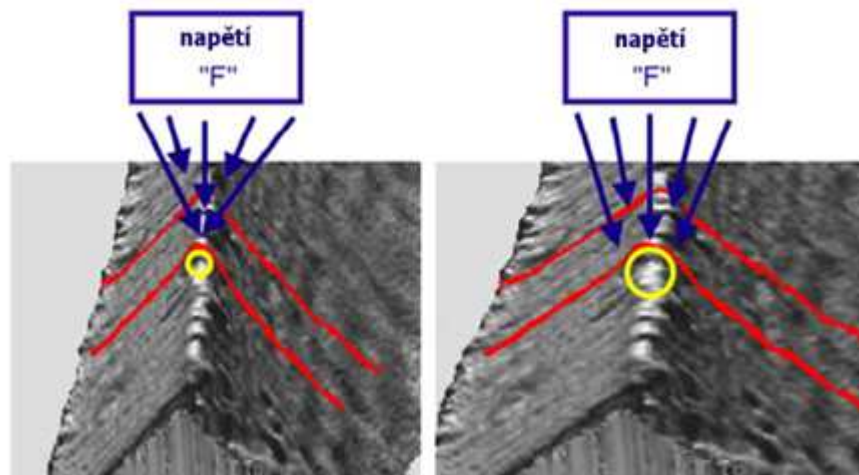
Mikrogeometrie nástroje reprezentuje hlavně zaoblení ostří a výsledný stav povrchu nástroje, kde hodnotí drsnost a kvalitu povrchu, a defekty substrátu vzniklé broušením. Broušením nelze dosáhnout dokonalé řezné hrany. Vzniklé defekty a mikrogeometrické útvary mají rozměry v řádech mikrometrů.

Proces výroby nástroje je ovlivněn volbou vhodného substrátu, který by měl plnit kladené požadavky a zároveň umožnit výrobu vysoce kvalitního ostří. Skutečná řezná hrana mezi čelem a hřbetem nástroje je na rozdíl od teoretické řezné hrany zaoblená přechodovou plochou. Parametry zaoblení ostří závisí na substrátu polotovaru, technologii výroby a na technologii konečné úpravy břitu.



Obr. 2-9: Řezná hrana před a po úpravě povrchu [14]

Nedokonalá řezná hrana vzniklá po broušení se cíleně upraví, aby se ovlivnily vlastnosti nástroje a jeho chování v procesu řezání. Úprava mikrogeometrie řezné hrany se obvykle provádí před a po depozici tenké vrstvy. Cílem úpravy povrchu nástroje před depozicí je zvýšit užitečné vlastnosti povrchu tak, aby došlo ke zvýšení kohezních vlastností mezi povrchem substrátu a tenkou vrstvou. Vlivem předdepoziciční úpravy dojde k zaoblení řezné hrany, která má vliv na celkovou řezivost nástroje. Zaoblením řezné hrany se rozloží tlak do větší plochy a ovlivní tepelné a silové namáhání nástroje (obr. 2-10). Celkové silové namáhání a rozložení řezných sil do směrů jednotlivých nástrojových rovin je ovlivněno velikostí a tvarem zaoblení hrany.

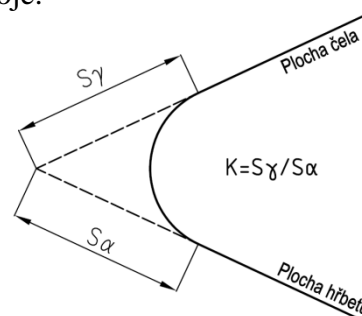


Obr. 2-10: Rozložené napětí na řezné hraně [14]

Úpravou řezné hrany po depozici tenké vrstvy se získá vysoce kvalitní povrch nástroje s velmi nízkým stupněm drsnosti R_a (R_z , R_y , R_t , atd.). Také má v některých případech příznivý vliv na snížení tepelného namáhání a abrazivní opotřebení nástroje.

Při mnoha testech trvanlivostí nástrojů bylo zjištěno, že výsledný stav povrchu nástroje významně ovlivňuje mechanismus otupování břitu a tím i trvanlivost nástroje. Tvar zaoblené řezné hrany se hodnotí na základě tzv. K faktoru, což je bezrozměrné číslo vyjadřující symetrii profilu ostří:

$$K = \frac{S_\gamma}{S_\alpha}$$



Obr. 2-11: K faktor na řezné hraně

kde: S_γ - vzdálenost počátku zaoblení od teoretické řezné hrany na čele nástroje

S_α - vzdálenost počátku zaoblení od teoretické řezné hrany na hřbetě nástroje

Pro úpravu mikrogeometrie se v dnešní době nejvíce používají tyto způsoby:

- Tryskání
- Kartáčování
- Omílání
- Magnetické dokončování
- Obrábění laserovým paprskem

2.3.5 Depozice tenké vrstvy [3,21,22,13,24,26,25, 27]

Tenkou vrstvou se rozumí vrstva o tloušťce několik desítek nanometrů až několik mikrometrů, která je vytvořena na podkladovém materiálu. Hlavním úkolem tenké vrstvy je chránit podkladový materiál před nepříznivými vlivy okolí. Jejich využití lze nalézt v několika různých průmyslových odvětvích. Ve strojírenství se nejvíce uplatňují otěruvzdorné vrstvy různých typů nitridů a to především na řezných a tvářecích nástrojích, nebo na vysoce namáhaných strojních součástech.

Depozice tenkých vrstev na řezné nástroje je v současné době důležitá věc, která umožňuje přiblížení k ideálnímu řeznému materiálu. Nástroje jsou pak schopny splňovat náročné požadavky a mají podstatně lepší užité vlastnosti, jako např.:

- několikanásobně větší trvanlivost
- vyšší produktivita a kvalita obrábění
- možnost vyšší řezné rychlosti
- možnost změny technologických procesů (suché obrábění, atd.)

Pro dosažení požadovaných vlastností systému tenká vrstva - substrát (obr. 2-12) je důležité plně chápat fyzikální podstatu a vliv parametrů na tyto vlastnosti.



Obr. 2-12: Funkce systému tenká vrstva - substrát [21]

V současné době se depozice tenkých vrstev využívá u různých druhů řezných materiálů. Tato práce je zaměřena na obrábění tvrdých ocelí pomocí monolitních nástrojů z SK. První deponované nástroje ze slinutého karbidu vyrobila firma Sandvik Coromant. Existuje několik metod nanášení tenké vrstvy na podkladový materiál, z čeho nejčastější jsou metody CVD a PVD. Obě tyto metody jsou důkladně popsány v mnoha odborných článcích a pracích. V tab. 2-4 jsou uvedeny výhody a nevýhody jednotlivých metod.

Metoda PVD	
Výhody	- nízká teplota depozice (250 až 550°C) - možnost deponování ostrých hran (poloměr zaoblení pod 20 μm) - nízký koeficient tření - možnost vytvořit kombinace různých druhů vrstev - vysoká odolnost vrstev - možnost výroby vrstev malých a přesných tloušťek - ekologičnost
Nevýhody	- relativně složitý vakuový systém - nutnost pohybu deponovaného předmětu (pro rovnoměrné nanášení vrstvy) - nutnost důkladnější přípravy povrchu deponovaného předmětu

Metoda CVD	
Výhody	- vysoká teplotní stability - vynikající adheze k materiálu - možnost vytvářet složité vrstvy - deponování předmětu ze všech stran (vlivem vysokých tlaků)
Nevýhody	- vysoká teplota depozice (900 až 1200°C) - nelze vytvářet některé typy vrstev - nelze deponovat ostré hrany - dlouhý čas depozice a vysoká energetická náročnost - tahové napětí ve vrstvě - ekologicky méně šetrné než PVD

Tab. 2-4: Výhody a nevýhody PVD a CVD metody

Při depozici je velmi důležitá adheze tenké vrstvy k substrátu. Pokud není adhezivní spojení kvalitní, dochází k degradaci systému tenká vrstva-substrát. Adhezi vrstvy lze ovlivnit předdepoziční přípravou substrátu, což je jakýkoliv proces ovlivňující čistotu, morfologii a chemické složení substrátu. Předdepoziční příprava zahrnuje následující činnosti:

- úprava řezné hrany
- chemické čištění substrátu
- iontové čištění substrátu
- odpovlakování (stripping) - pokud se jedná o redepozici tenké vrstvy

Tenké vrstvy pro obrábění tvrdých a pevných ocelí:

AlTiN a nACo - společnost LISS [27]

Vysoce výkonná vrstva AlTiN je vhodná pro obrábění materiálů s vyšší pevností a tvrdostí a při nedostatečném chlazení. Využívá se například pro vrtání, frézování a výrobu ozubení.

nACo je nanokompozitní vrstva na bázi AlTiN/Si₃N₄ s extrémně vysokou tepelnou odolností a vysokou tvrdostí. Využívá se například pro frézování kalených ocelí, ocelí s vysokou pevností, litin, nebo obrábění za sucha. Vrstva je vhodná pro obrábění při vysokých řezných rychlostech.

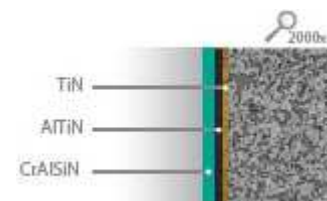
Technické parametry obou tenkých vrstev jsou zobrazeny v tab. 2-5.

	Barva	Max. teplota použití [°C]	Tvrdost [GPa]	Koeficient tření	Tloušťka povlaku [μm]	Teplota depozice [°C]
AlTiN	černá	850	33	0,7	1 až 4	480
nACo	fialověmodrá	1200	45	0,45	1 až 4	480

Tab. 2-5: Parametry povlaků AlTiN a nACo [27]

TripleCoating - firma SHM [24]

Povlak je tvořený třemi vrstvami. První je adhezivní vrstva TiN, která se nanáší na substrát. Následuje střední vrstva AlTiN, která má vynikající houževnatost a tvrdost. Poslední je extrémně tvrdá nanokompozitní vrstva CrAlSiN (obr. 2-13) [24]. Vrstva TripleCoating je vhodná pro velmi náročné aplikace, obrábění kalených materiálů a nerezí.



Obr. 2-13: Struktura vrstvy [24]

HSN² a Hyperlox - firma CemeCon [25]

Nově vyvinutý povlak HSN² je určený především pro frézování kalených s tvrdostí 60+ HRC. Jedná se o třívrstvou nanokompozitní vrstvu s extrémní tvrdostí, teplotní stabilitou a chemickou odolností.

Vrstva Hyperlox je předchudcem vrstvy HSN² a je zkonstruována tak, aby odolala i těžce obrobitelným materiálům při vysokých řezných rychlostech při minimálním použití řezné kapaliny. Tenká vrstva Al₂O₃ na povrchu povlaku chrání nástroj před účinky abraze a vytváří mezi nástrojem a obrobkem tepelnou bariéru.

Základní údaje povlaků jsou zobrazeny v tab. 2-6:

	Barva	Max. teplota použití [°C]	Tvrdost [HV0,05]	Typ povlaku	Struktura povlaku
HSN²	lilková	1100	3800	2. generace TiAl _x N supernitridů	třívrstvý nanokompozit
Hyperlox	antracitová	1100	3700	2. generace AlTiN supernitridů	nanokompozit

Tab. 2-6: Základní údaje povlaků HSN² a Hyperlox [25]

Balinit ALDURA - firma Oerlikon Balzers [26]

Vrstva vyvinutá pro stopkové frézy k obrábění a zpracování těžkoobrobitelných materiálů a nejtvrďší oceli. Povlak je tvořen základní vrstvou TiAlN (výborná přílnavost) a nanokrystalickou vrstvou na bázi AlCrN, která se vyznačuje vynikající tvrdostí za tepla, chemickou stálostí a tepelnou izolací.

	Barva	Max. teplota použití [°C]	Tvrdost [HV0,05]	Typ povlaku	Součinitel tření
Balinit ALDURA	modrošedá	1100	3300	AlCrN báze	0,35 až 0,40

Tab. 2-7: Základní parametry vrstvy Balinit ALDURA [26]

2.3.6 Příklady nástrojů [16,17,18,19,20]

2.3.6.1 Stopkové frézovací nástroje od firmy FRANKEN [16]

Pro obrábění tvrdých materiálů vyvinula firma FRANKEN nové řady dokončovacích fréz ze speciálního jemnozrnného slinutého karbidu, který je optimalizovaný pro obrábění tvrdých materiálů (kalené oceli).

Válcové frézy S-Hard-Cut:



Obr. 2-14: Fréza S-Hard-Cut [16]

- Tvrdokovové frézy s rovinným čelem - materiál K5-20FH, povlak TiAlN, tolerance h10

	Průměr [mm]	Počet břitů	Úhel šroubovice [°]	Použití do
Dlouhé provedení, méně než 3x D	6 - 20	6 - 8	50	52 - 66 HRC

Tab. 2-8: Parametry čelní válcové frézy S-Hard-Cut [16]

- Tvrdokovové frézy s kulovým čelem - materiál K5-20FH, povlak TiAlN, tolerance 0,02 mm

	Průměr [mm]	Počet břitů	Úhel šroubovice [°]	Použití do
Dlouhé provedení	2 - 20	2	30	40 - 63 HRC

Tab. 2-9: Parametry kulové frézy S-Hard-Cut [16]

2.3.6.2 Nástroje od firmy Zecha Hartmetall [17]

Firma Zecha dodává toroidní a kulové frézy prémiových sérií 581H a 583H pro obrábění kalených ocelí. Frézy mají speciální geometrii a vyvinutý povlak, což během obrábění zajišťuje optimální tvorbu třísky. Nástroje dosahují maximální přesnosti, extrémní výrobní možnosti a vysoké životnosti. Používají se například na obrábění CrCo a tvrdých ocelí do 65 HRC v přesnostech na μm . Leštěné řezné hrany nástrojů a geometrie šroubovice zajišťují hladký odchod třísky a nízké opotřebení.



Obr. 2-16: Fréza 597T

[<http://www.zecha.de/images/pdf/597t.pdf>]



Obr. 2-15: Fréza série 581H [17]

Toroidní frézy typu 597T nabízejí asymetrické dělení svých břitů i šroubovice ve spojení se dvěma řeznými břity ke středu.

2.3.6.3 Monolitní karbidové frézy od SANDVIK Coromant - CoroMill Plura [18]

Sortiment nástrojů umožňuje obrábět naprostou většinu materiálů od těžkoobrobitelných, až po tvrdé oceli s tvrdostí až 63 HRC. Sortiment obsahuje nástroje pro hrubování i dokončování, pro HSM i HFM obrábění, pro výrobu zápustek i forem.

Řada 1:

- vysoká výkonnost a bezpečnost obrábění
- součásti různých tvarů, velikostí a materiálů
- umožňuje max. využití stroje

Řada 2:

- geometrie a nástrojové třídy pro určité typy materiálů
- umožňuje dosažení max. objemu výroby za jednotku času



Obr. 2-17: Řada nástrojů CoroMill Plura 1 a 2 [18]

Konstrukční provedení nástrojů s proměnnou hloubku drážky (VFD), což umožňuje dosažení optimální tuhosti jádra a odvod třísky. Pro dosažení maximální stability je použita koncepce s proměnným úhlem stoupání šroubovice.

2.3.6.4 Monolitní frézy od firmy Fraisa [19]**Vysoce výkonná fréza Fraisa HX-H:**

Obr. 2-18: Fréza Fraisa HX-H [19]

Hrubovací fréza s hladkým břitem se vyrábí v průměrech od 3 do 20 mm. Je vhodná například pro stroje, které disponují menšími otáčkami a dynamikou, ale dostatečným výkonem a kroučícím momentem. Obrábí se malou řeznou rychlostí a posuvem, ale s velkým průřezem třísky. Životnost nástroje se pohybuje okolo 40 až 50 minut.

Vysoce výkonná fréza Fraisa HX-RS:

Obr. 2-19: Fréza Fraisa HX-RS [19]

Vyrábí se s průměrem od 8 do 20 mm a je vhodná pro HSC obrábění s vysokou řeznou rychlostí a posuvem. Nástroj je vhodné použít, pokud je k dispozici stroj, který má vysoké otáčky a dobrou dynamiku. Průřez třísky při obrábění je malý. Životnost nástroje je při tomto způsobu obrábění několik hodin.

2.3.6.5 Toroidní fréza firmy WNT [20]

Nová toroidní fréza SCR kombinuje HSC a HPC obrábění. Fréza je schopná provádět různé konvenční frézovací operace. Při použití této frézy není potřeba vyměňovat nástroje mezi dvěma uvedenými strategiemi hrubování, což zkracuje dobu cyklu a snižuje náklady.



Obr. 2-20: Toroidní fréza SCR [20]

Fréza SCR má speciální patentovanou geometrii čelní plochy, čelních drážek a poloměrů. Geometrie na čelní ploše je tvořena dvěma poloměry, které se kombinují a vytvářejí teoretický poloměr ($r3D$), který se používá při programování dráhy nástroje. Velký poloměr na čele umožňuje vysoký posuv, zatímco menší rohový poloměr chrání ostří před opotřebením a zvyšuje životnost nástroje. Vysoké posuvy zkracují dobu hrubovacích cyklů, ale nástroj může



Obr. 2-21: Pohled na čelo nástroje SCR [20]

být použit také k dokončování vnějším průměrem frézy.

Nástroj má nepravidelné stoupání šroubovice, což zamezuje vzniku vibrací a zvyšuje jakost povrchu po obrobení. Hlubší provedení drážek a přívod vzduchu osou nástroje napomáhá při frézování drážek až do $1x D$. Profil čelní plochy břitů ve tvaru S a nerovnoměrná rozteč zubů snižuje řezný odpor. Nástroje jsou v rozmezí průměrů 3 až 16 mm a standardně se čtyřmi zubovými drážkami.

3 Návrh a realizace experimentu

Cílem experimentu je zjistit a porovnat trvanlivosti monolitních fréz ze slinutého karbidu, při obrábění kalené oceli ČSN 19 436. Experiment byl rozdělen na dvě části, kdy v první části byla provedena krátkodobá zkouška dle A. S. Kondratova, pro zjištění optimální řezné rychlosti pro trvanlivost nástrojů 15 minut. Druhá část experimentu zahrnuje dlouhodobou zkoušku, ze které byly zjištěny trvanlivosti jednotlivých fréz pro stanovené řezné podmínky obrábění.

Testované nástroje se liší z mnoha různých hledisek, jako je geometrie nástroje, mikrogeometrie, deponovaná tenká vrstva, nebo substrát SK. Experiment tedy hodnotí a porovnává trvanlivosti jednotlivých nástrojů z komplexního hlediska.

3.1 Nástroje a obráběný materiál

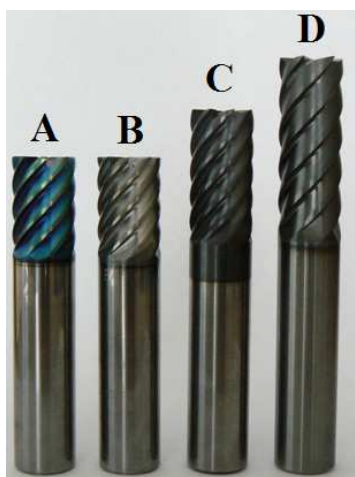
3.1.1 Nástroje

Při experimentu byly použity 4 různé monolitní frézy označené A, B, C, D, přičemž pro každý nástroj byla možnost jednoho opakování. Nástroje jsou zobrazeny na obr. 3-2 a jejich základní parametry jsou uvedeny v tab. 3-1. Všechny nástroje jsou vyrobeny ze slinutého karbidu, ovšem jednotlivé substráty se mohou lišit (velikost zrn, atd.). Geometrie, mikrogeometrie a deponované vrstvy nástrojů jsou rovněž rozdílné a nejsou blíže specifikované.

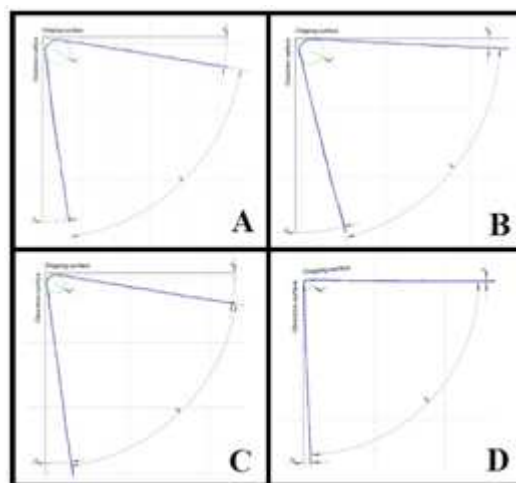
Nástroj D byl podle předpokladu zvolen jako etalonový nástroj. Průměry všech nástrojů jsou shodné. Na obr. 3-1 jsou zobrazeny průřezy břitů jednotlivých nástrojů naměřené na měřicím přístroji IFM-G4 od firmy Alicona.

	A	B	C	D
Počet zubů z	8	8	8	6
Průměr D [mm]	16	16	16	16
Úhel břítu β [°]	72 až 75	72 až 75	72 až 75	85 až 89
Poloměr zaoblení ostří r [μm]	4 až 9	4 až 9	3 až 7	3 až 5

Tab. 3-1: Základní parametry nástrojů



Obr. 3-2: Použité nástroje



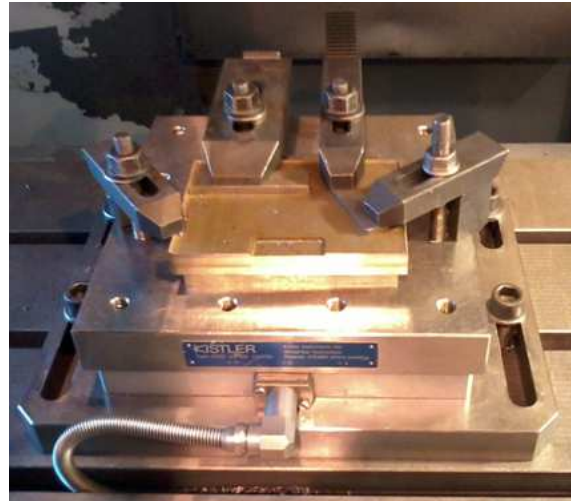
Obr. 3-1: Průřezy břitů nástrojů

3.1.2 Materiál

Jako materiál polotovaru pro testování byla využita kalená nástrojová ocel ČSN 19 436. Tento materiál byl vybrán s ohledem na přání zadavatele. Materiál dosahoval tvrdosti až 62 HRC. Charakteristika oceli a její chemické složení jsou uvedeny v příloze této práce. Polotovaru byl ve formě desky (obr. 3-3) o rozměrech 150 x 150 x 17 mm. Materiál byl pomocí upínek upnut k dynamometru (obr. 3-4), protože součástí experimentu bylo i měření řezných sil při procesu obrábění.



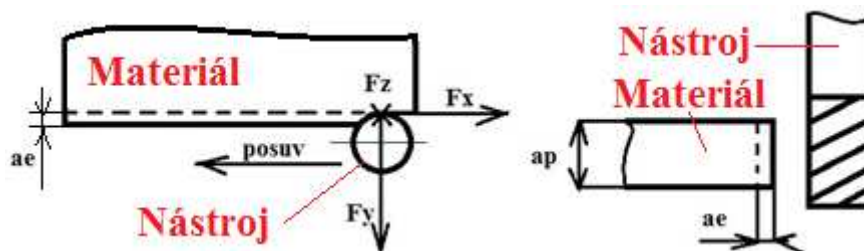
Obr. 3-4: Obráběný polotovaru



Obr. 3-3: Upnutý obrobek na dynamometru

3.2 Strategie a podmínky obrábění

Zvolenou strategií obrábění bylo obvodové (válcové) frézování, což znamená, že veškerý materiál byl odebrán válcovou částí nástroje. Schematicky je způsob frézování zobrazen na obr. 3-5. Materiál byl odebrán vždy na jedné straně polotovaru (desky) a obrábění probíhalo v jednom směru. Jednalo se o sousledné frézování.



Obr. 3-5: Schéma způsobu obrábění

Obrábění se skládalo z jednotlivých přejezdů, což znamená, že se jednalo o přerušovaný řez. Tloušťka odebrané vrstvy a_e během každého přejezdu byla konstantní, stejně jako posuv na zub nástroje f_z . Hloubka řezu a_p odpovídala tloušťce desky (obr. 3-5).



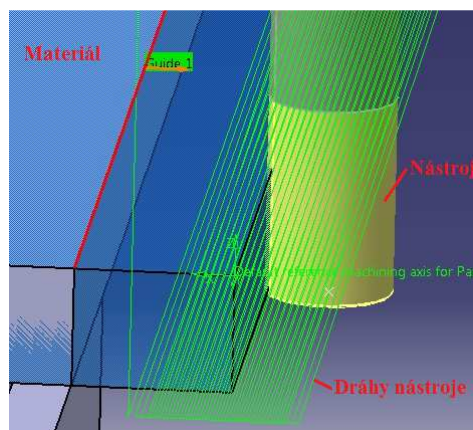
Obr. 3-6: Použitý hydraulický upínač [3]

Nástroje byly upnuty do hydraulického upínače (obr. 3-6). Při obrábění nebyla použita řezná kapalina, aby se předešlo vzniku tepelných šoků (obrábění za sucha).

Před zahájením samotného experimentu byly stanoveny prvotní řezné podmínky. Tyto podmínky vycházely z doporučených řezných podmínek pro monolitní nástroje ze slinutého karbidu pro obrábění tvrdých ocelí. Z doporučených podmínek od různých výrobců nástrojů byly stanoveny řezné podmínky zobrazené v tab. 3-2.

v_c [m/min]	f_z [mm]	a_e [mm]
75	0,06	0,48

Tab. 3-2: Prvotní stanovené řezné podmínky



Obr. 3-7: Dráhy nástroje při obrábění

3.3 Pre-experiment

S použitím výše stanovených řezných podmínek byl proveden pre-experiment, jehož hlavním cílem bylo zjistit vhodnost stanovených podmínek a následně tyto podmínky optimalizovat. Pro pre-experiment byl použit nástroj N, u něhož byly známy jen některé parametry (tab. 3-3). Ostatní parametry nástroje nebyly blíže specifikovány.

z	D [mm]	Materiál
4	16	Slinutý karbid

Tab. 3-3: Známé parametry nástroje N

Pro optimalizaci řezných podmínek byla s tímto nástrojem provedena krátkodobá zkouška podle A. S. Kondratova, jejíž výsledkem je optimální řezná rychlost pro trvanlivost 15 min.

Nejprve se na nástroji při obrábění za stanovených podmínek vytvořilo prvotní opotřebení na hřbetě VB. Toto opotřebení by mělo sloužit k tomu, aby samotná krátkodobá zkouška

Katedra Technologie Obrábění

Bc. Tomáš Bakša

probíhala v lineární oblasti Taylorovy křivky. Následovalo obrábění, během kterého byla postupně zvyšována řezná rychlost v_c . Krok zvyšování řezné rychlosti byl stanoven na 10 m/min. Pro každou řeznou rychlost byl měřen čas obrábění a velikost opotřebení na hřbetě VB, které vzniklo během obrábění danou řeznou rychlostí. Jako kritériální opotřebení byla zvolena hodnota $VB_{krit} = 0,15$ mm.

Ze zjištěných hodnot opotřebení za určitý časový úsek ΔT odpovídající jednotlivým řezným rychlostem byly vypočteny intenzity opotřebení I pro jednotlivé řezné rychlosti a byl vytvořen graf závislosti intenzity opotřebení na řezné rychlosti (v logaritmických souřadnicích). Následně byla z daného vztahu vypočtena hodnota intenzity opotřebení I_{ekv} a z grafu závislosti (I na v_c) stanovena hodnota řezné rychlosti v_{ekv} odpovídající I_{ekv} . Směrnice přímky m byla získána z rovnice přímky (závislosti I na v_c).

Pomocí těchto hodnot byla vypočtena konstanta c_{vT} zjednodušeného Taylorova vztahu. Z Taylorova vztahu byla následně pro trvanlivost $T = 15$ min vypočtena optimální řezná rychlost v_{15} . Pro výpočet byly použity následující vztahy:

$$I = \frac{\Delta VB}{\Delta T} \quad I_{ekv} = \frac{\Sigma \Delta VB}{\Sigma \Delta T} \quad c_{vT} = v_{ekv} \cdot (\Sigma \Delta T)^{1/m} \quad v_{15} = \frac{c_{vT}}{T^{1/m}}$$

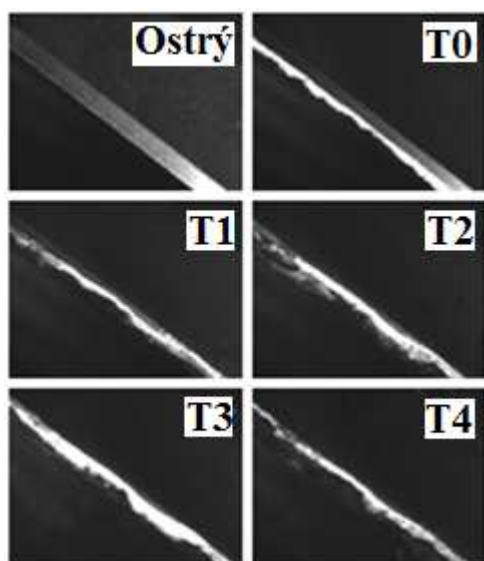
kde:

 I - intenzita opotřebení [$\mu\text{m}/\text{min}$] ΔVB - přírůstek opotřebení na hřbetě břitu [μm] ΔT - čas obrábění odpovídající řezné rychlosti [min] v - řezná rychlost [m/min]

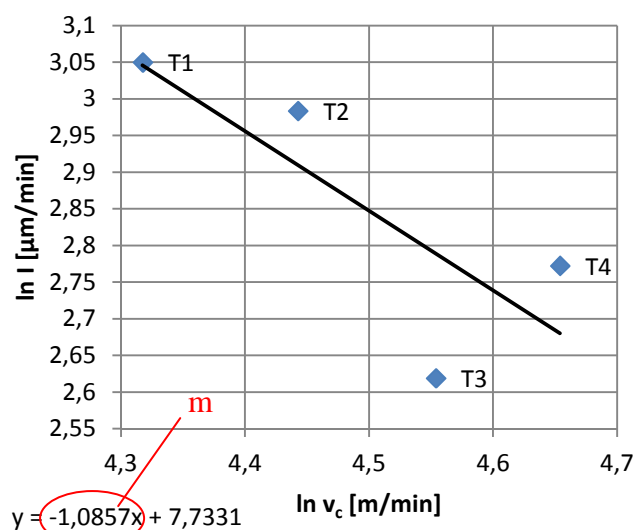
V tab. 3-4 jsou uvedeny naměřené a vypočtené hodnoty z krátkodobé zkoušky pro nástroj N. Výsledná závislost intenzity opotřebení v logaritmických souřadnicích je zobrazena v grafu 3-1.

A. S. Kondratov - nástroj N				
posuv f_z [mm/zub]	šířka řezu a_e [mm]	hloubka řezu a_p [mm]	Optimální řezná rychlost pro	
0,06	0,48	-	T = 15 min; $v_{15} = 192$ m/min	
Řezná rychlost [m/min]		Přírůstek času řezání ΔT [min]	Přírůstek opotřebení ΔVB [μm]	Intenzita opotřebení I [$\mu\text{m}/\text{min}$]
v_{c1}	75	2,91	61,5	21,11
v_{c2}	85	1,47	29	19,75
v_{c3}	95	0,98	13,5	13,72
v_{c4}	105	0,59	9,5	15,99
Součet:		5,96	113,5	
v_{ekv} [m/min]		m [-]	c_{vT} [-]	v_{15} [m/min]
82,143		-1,0857	15,869	192,22

Tab. 3-4: Naměřené a vypočtené hodnoty krátkodobé zkoušky nástroje N



Obr. 3-8: Průběh opotřebení nástroje N



Graf 3-1: Závislost intenzity opotřebení na řezné rychlosti

Z grafu je zřejmé, že závislost intenzity opotřebení na řezné rychlosti má klesající průběh, což způsobilo, že výsledná optimální řezná rychlost pro trvanlivost 15 minu je $v_{15} = 192$ m/min. Na obr. 3-8 je vidět průběh opotřebení břitu od ostrého břitu až po jeho otupení.

Na základě této zkoušky došlo ke změně některých řezných parametrů, a to konkrétně hodnoty a_e a posuvu na zub f_z . Konečné hodnoty těchto parametrů jsou uvedeny v tab. 3-5. V průběhu dalších částí experimentu zůstaly tyto parametry konstantní.

Původní parametry		Nové parametry	
f_z [mm]	a_e [mm]	f_z [mm]	a_e [mm]
0,06	0,48	0,08	0,5

Tab. 3-5: Změna některých parametrů

3.4 Krátkodobá zkouška dle A. S. Kondratova

V první části experimentu byla provedena krátkodobá zkouška u všech nástrojů - A, B, C, D. Cílem bylo zjistit optimální řeznou rychlost pro trvanlivost 15 min u jednotlivých nástrojů a následně určit řeznou rychlost pro druhou část experimentu (dlouhodobou zkoušku). Postup zkoušky probíhal podobně, jako při nástroji N v pre-experimentu.

3.4.1 Nástroj A

Krátkodobá zkouška probíhala za konstantního úběru a_e a posuvu f_z , jejichž hodnoty byly stanoveny v pre-experimentu. Počáteční řezná rychlost a čas obrábění, při kterém bylo vytvořeno prvotní opotřebení jsou zobrazeny v tab. 3-6.

v_{c0} [m/min]	T_0 [min]	VB_0 [mm]
60	7,8	0,0173

Tab. 3-6: Parametry prvotního opotřebení nástroje A

Po prvotním otupení následovalo obrábění za různých řezných rychlostí s krokem 15 m/min, během kterých bylo měřeno opotřebení na hřbetě břitu VB. Z přírůstků opotřebení za určitý

Katedra Technologie Obrábění

Bc. Tomáš Bakša

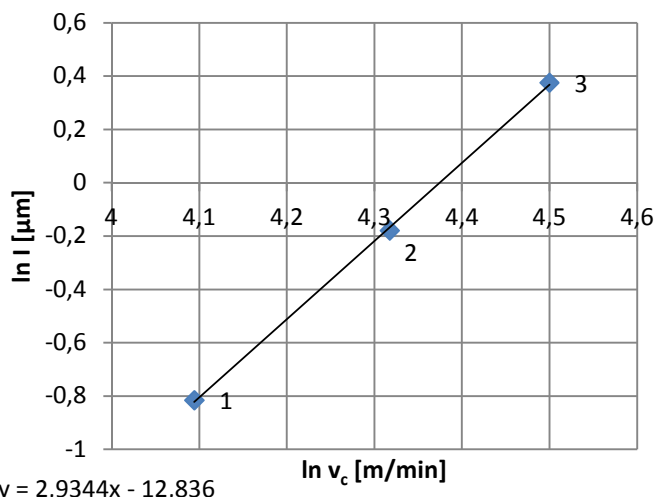
časový úsek byla určena závislost intenzity opotřebení na řezné rychlosti a následně pomocí vztahů (viz. pre-experiment) vypočtena optimální řezná rychlost pro trvanlivost $T = 15$ min.

Naměřené a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v následující tab. 3-7.

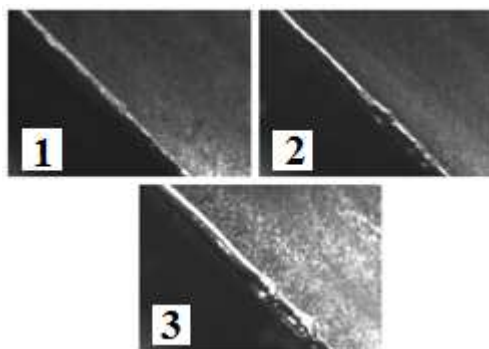
A. S. Kondratov - nástroj A				
posuv f_z [mm/zub]	šířka řezu a_e [mm]	hloubka řezu a_p [mm]	Optimální řezná rychlost pro	
0,08	0,5	-	$T = 15$ min; $v_{15} = 127,65$ m/min	
Řezná rychlost [m/min]		Přírůstek času řezání ΔT [min]	Přírůstek opotřebení ΔVB [μm]	Intenzita opotřebení I [$\mu\text{m}/\text{min}$]
v_{c1}	60	9,95	4,4	0,442
v_{c2}	75	40,2	33,6	0,836
v_{c3}	90	15,6	22,7	1,455
Součet:		65,75	60,7	
v_{ekv} [m/min]		m [-]	c_{vT} [-]	v_{15} [m/min]
77,141		2,934	321,2775	127,65

Tab. 3-7: Naměřené a vypočtené hodnoty krátkodobé zkoušky nástroje A

Závislost intenzity opotřebení na řezné rychlosti je zobrazena v grafu 3-2.

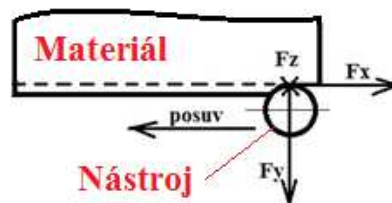


Graf 3-2: Závislost intenzity opotřebení na řezné rychlosti



Obr. 3-9: Průběh opotřebení nástroje A

Z krátkodobé zkoušky vyplývá, že optimální řezná rychlost pro trvanlivost $T = 15$ min pro nástroj A je $v_c = 127,65$ m/min. Při frézování se nedosáhlo kritériálního opotřebení $VB_{krit} = 0,150$ mm, protože v průběhu obrábění vznikaly na břitech nástroje vruby, které by vedly k destrukci nástroje před dosažením kritického opotřebení. Vzniklé opotřebení v průběhu

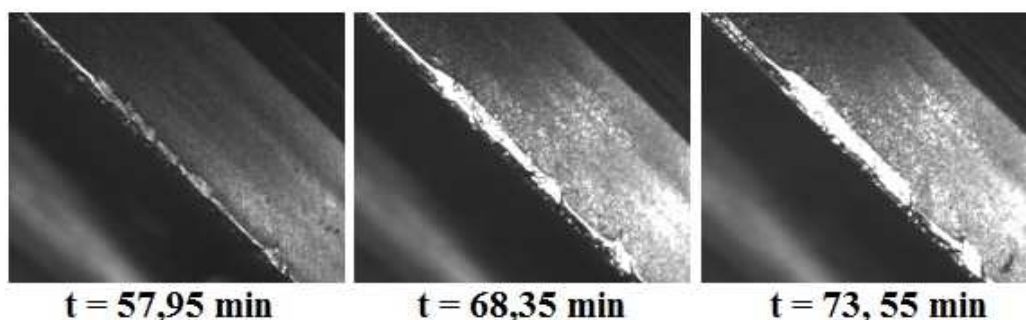


Obr. 3-10: Schéma působení řezných sil

Katedra Technologie Obrábění

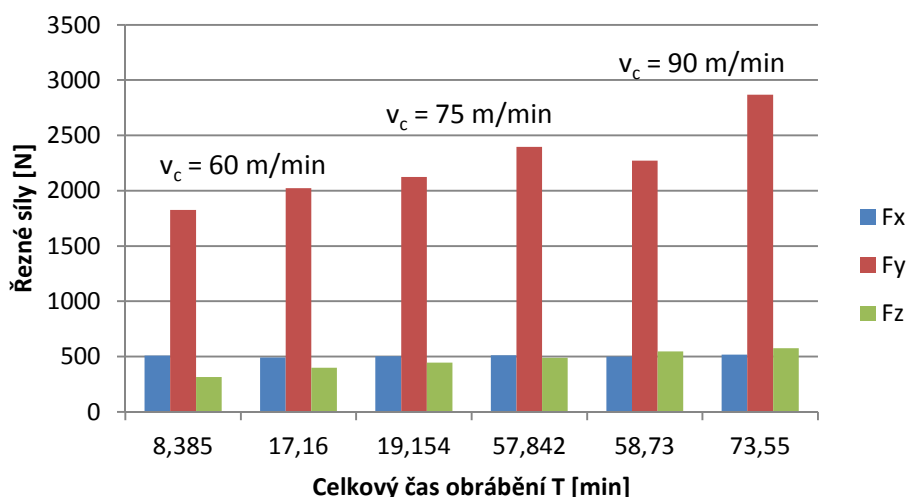
Bc. Tomáš Bakša

obrábění je zobrazeno na obr. 3-9. Vruby na některých břitech začaly vznikat při řezné rychlosti 75 m/min (obr. 3-11).



Obr. 3-11: Vznik vrubu na břitu 2

Během krátkodobé zkoušky byly měřeny i řezné síly pomocí dynamometru Kistler (viz. příloha). Průběh sil je zobrazen v grafu 3-3. Z Graf 3-3 je patrné, že dominantní složkou řezných sil je složka F_y , která se zvyšovala s časem obrábění. Ostatní složky řezných sil zůstávaly v průběhu stejné, nebo se zvyšovaly jen mírně.



Graf 3-3: Průběh řezných sil při krátkodobé zkoušce u nástroje A

3.4.2 Nástroj B

Stejně jako v případě předchozího nástroje, bylo nejprve vytvořeno prvotní otupení nástroje B počáteční řeznou rychlostí v_{c0} .

v_{c0} [m/min]	T_0 [min]	VB_0 [mm]
75	5,46	0,0213

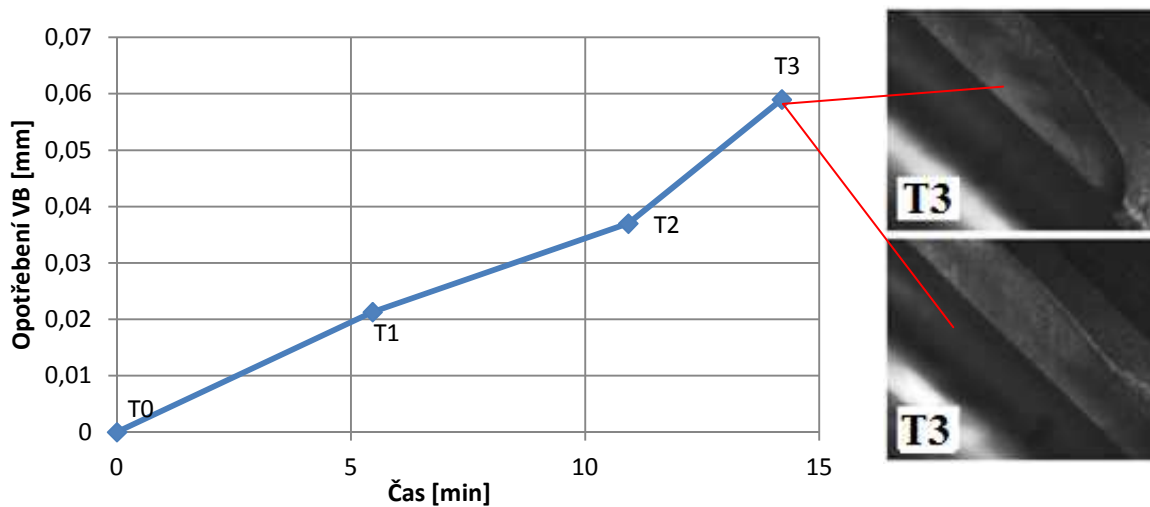
Tab. 3-8: Parametry prvotního opotřebení nástroje B

Poté byl materiál obráběn za stejných řezných podmínek. V průběhu časového úseku, při kterém měl být břit nástroje postupně otupován, došlo k vylomení několika břitů nástroje. V důsledku toho nebylo možné zvýšit řeznou rychlost a tedy ani vyhodnotit krátkodobou zkoušku dle A. S. Kondratova. K vylomení břitů došlo zřejmě z důvodu vysokého tepelného

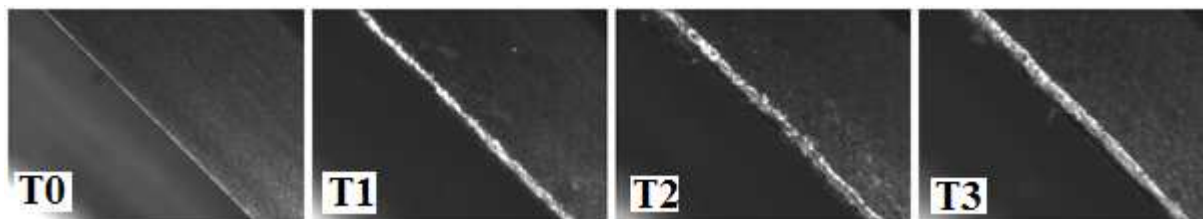
Katedra Technologie Obrábění

Bc. Tomáš Bakša

namáhání nástroje. V grafu 3-4 je zobrazen časový průběh opotřebení až do destrukce nástroje. V grafu je rovněž zobrazen vyložený břit nástroje.

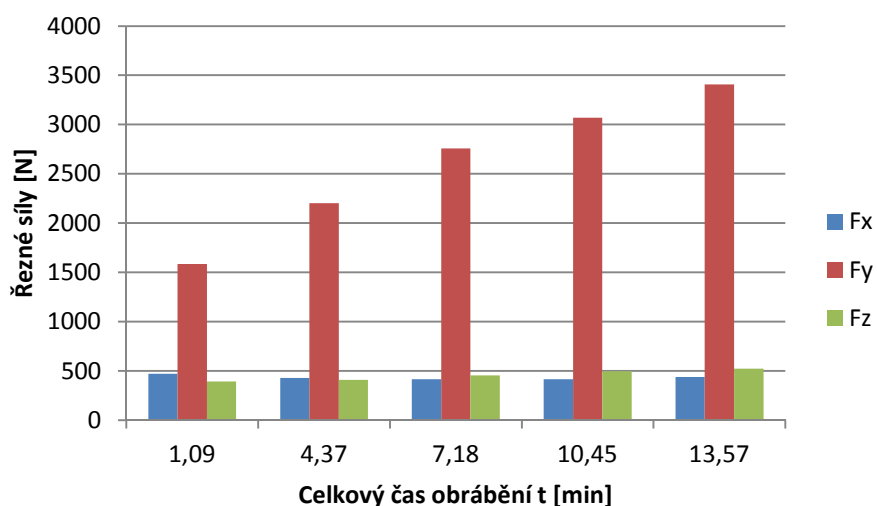


Graf 3-4: Závislost opotřebení na čase při krátkodobé zkoušce nástroje B



Obr. 3-12: Průběh opotřebení nástroje B

Během zkoušky byly měřeny i řezné síly, jejichž průběh byl podobný jako u předchozího nástroje (graf 3-5).



Graf 3-5: Průběh řezných sil při krátkodobé zkoušce u nástroje B

3.4.3 Nástroj C

Prvotní otupení nástroje C bylo získáno při řezné rychlosti v_{c0} (tab. 3-9). Řezná rychlost byla následně zvýšena na hodnotu $v_{c1} = 90$ m/min, při které se za určitý časový úsek měřilo opotřebení na hřbetě břitů. Krok zvyšování rychlosti byl stanoven na 15 m/min.

v_{c0} [m/min]	T_0 [min]	VB_0 [mm]
75	19,91	0,06

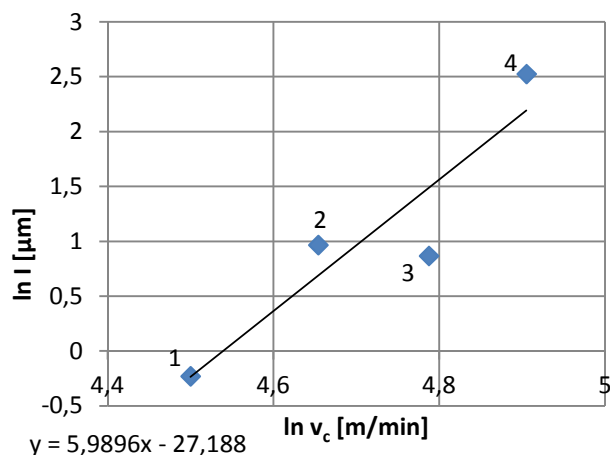
Tab. 3-9: Parametry prvotního opotřebení nástroje C

Pro vyhodnocení krátkodobé zkoušky by použity čtyři řezné rychlosti. Naměřené a vypočtené hodnoty jsou zobrazeny v tab. 3-10.

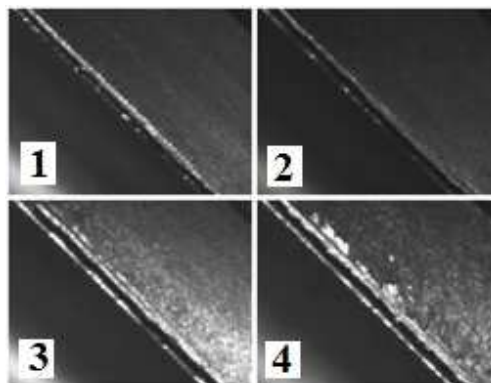
A. S. Kondratov - nástroj C			
posuv f_z [mm/zub]	šířka řezu a_e [mm]	hloubka řezu a_p [mm]	Optimální řezná rychlost pro
0,08	0,5	-	$T = 15$ min; $v_{15} = 119,68$ m/min
Řezná rychlost [m/min]	Přírůstek času řezání ΔT [min]	Přírůstek opotřebení ΔVB [μ m]	Intenzita opotřebení I [μ m/min]
v_{c1}	90	15,47	0,795
v_{c2}	105	7,99	2,628
v_{c3}	120	2,94	2,381
v_{c4}	135	2	12,5
Součet:		28,4	65,3
v_{ekv} [m/min]	m [-]	c_{vT} [-]	v_{15} [m/min]
107,5773	5,9896	188,0879	119,68

Tab. 3-10: Naměřené a vypočtené hodnoty krátkodobé zkoušky nástroje C

Závislost intenzity opotřebení na řezné rychlosti je zobrazena v grafu 3-6.



Graf 3-6: Závislost intenzity opotřebení na řezné rychlosti

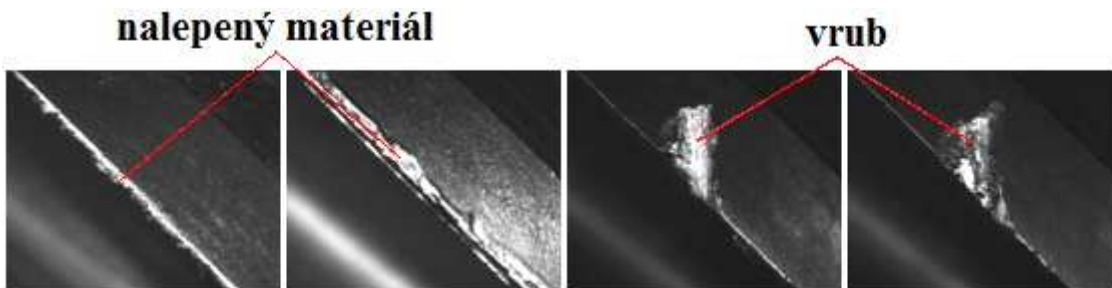


Obr. 3-13: Průběh opotřebení nástroje C

Katedra Technologie Obrábění

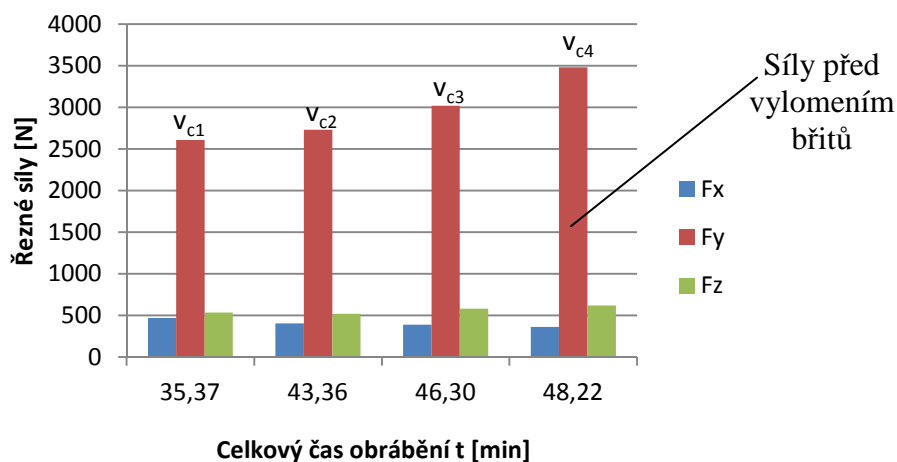
Bc. Tomáš Bakša

Výsledkem krátkodobé zkoušky byla optimální řezná rychlost $v_{15} = 119,68$ m/min pro trvanlivost 15 min. Při obrábění vznikly vruby na všech břitech v místě kontaktu s povrchem polotovaru. Během frézování docházelo rovněž k nalepování materiálu na břit nástroje (obr. 3-14).



Obr. 3-14: Nalepování materiálu a vznik vrubů

Vlivem vysokých řezných teplot a nalepování obráběného materiálu došlo při řezné rychlosti $v_{c4} = 135$ m/min k vylomení břitů frézy. Dominantní složka řezné síly F_y v průběhu obrábění stoupala, zatím co složka řezné síly F_x mírně klesala (graf 3-7).



Graf 3-7: Průběh řezných sil při krátkodobé zkoušce u nástroje C

3.4.4 Nástroj D

Parametry prvotního opotřebení jsou zobrazeny v tab. 3-11.

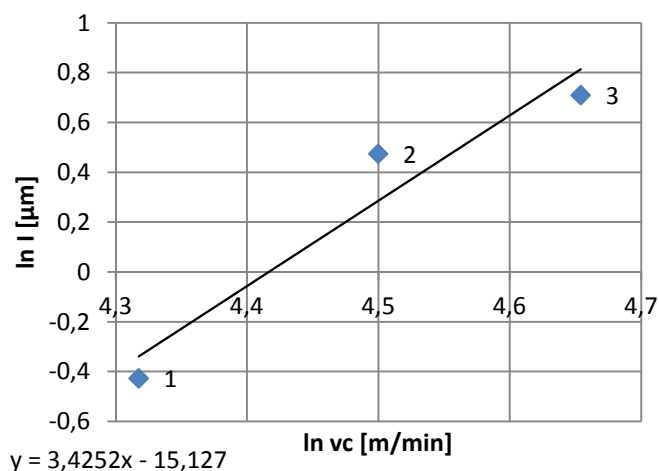
v_{c0} [m/min]	T_0 [min]	VB_0 [mm]
75	19,9	0,035

Tab. 3-11: Parametry prvotního opotřebení nástroje D

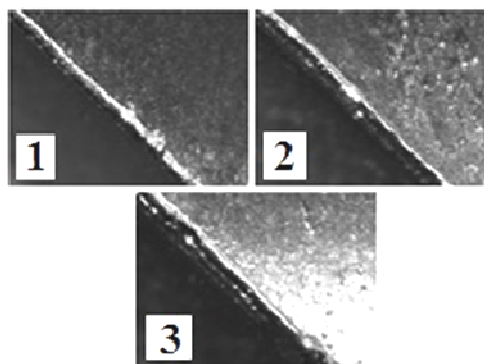
Krok zvyšování řezné rychlosti byl stejně jako v předchozích případech 15 m/min. První řezná rychlost, při které byly měřeny hodnoty opotřebení na hřbetě břitu byla stejná jako při počátečním otupení. Naměřené a vypočtené hodnoty krátkodobé zkoušky jsou zobrazeny v tab. 3-12.

A. S. Kondratov - nástroj D				
posuv f_z [mm/zub]	šířka řezu a_e [mm]	hloubka řezu a_p [mm]	Optimální řezná rychlost pro	
0,08	0,5	-	$T = 15 \text{ min}; v_{15} = 124,88 \text{ m/min}$	
Řezná rychlost [m/min]		Přírůstek času řezání ΔT [min]	Přírůstek opotřebení ΔVB [μm]	Intenzita opotřebení I [$\mu\text{m/min}$]
v_{c1}	75	24,5	16	0,653
v_{c2}	90	16,6	26,7	1,608
v_{c3}	105	9,14	18,6	2,035
Součet:		50,24	61,3	
v_{ekv} [m/min]		m [-]	c_{vT} [-]	v_{15} [m/min]
87,75		3,4252	275,3387	124,88

Tab. 3-12: Naměřené a vypočtené hodnoty krátkodobé zkoušky nástroje D

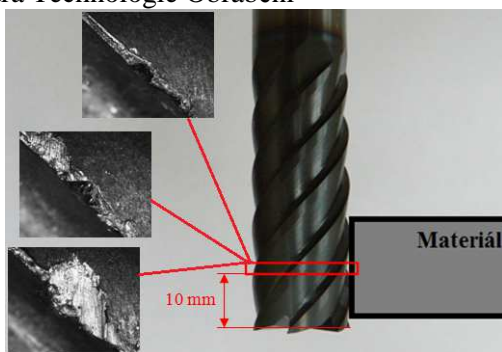


Graf 3-8: Závislost intenzity opotřebení na řezné rychlosti

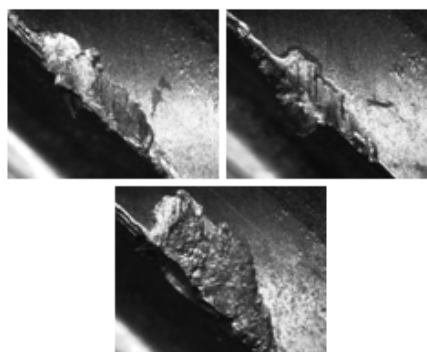


Obr. 3-15: Průběh opotřebení nástroje D

Vypočtená optimální řezná rychlost pro $T = 15 \text{ min}$ byla $v_{15} = 124,88 \text{ m/min}$. V průběhu obrábění docházelo ke vzniku vrubů na všech břitech v místě přibližně 10 mm od čela nástroje (obr. 3-17).

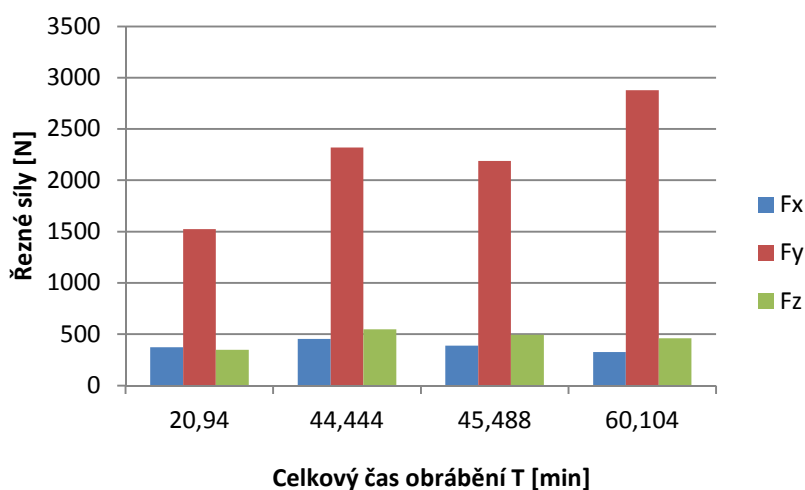


Obr. 3-17: Místo vzniku vrubů



Obr. 3-16: Vruby vzniklé na březích nástroje

Vznik těchto vrubů mohlo být způsobeno nehomogenitou materiálu polotovaru. Průběh řezných sil je znázorněn v grafu 3-9.



Graf 3-9: Průběh řezných sil při krátkodobé zkoušce u nástroje D

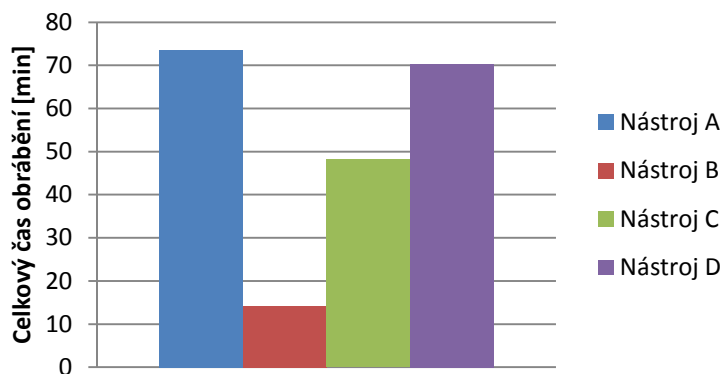
3.4.5 Výsledky krátkodobé zkoušky

Výsledkem krátkodobé zkoušky jsou optimální řezné rychlosti v_{15} pro trvanlivost $T = 15$ min. Hodnoty těchto rychlostí jsou shrnuty v tab. 3-13. Pro nástroj B nebylo možné vypočítat optimální řeznou rychlost vlivem vylámaní břitů nástroje v průběhu zkoušky.

	Nástroj A	Nástroj B	Nástroj C	Nástroj D
v_{15} [m/min]	127,65	-	119,68	124,88

Tab. 3-13: Výsledné řezné rychlosti pro trvanlivost 15 min

Celkový čas obrábění během krátkodobé zkoušky:



Graf 3-10: Celkový čas obrábění při krátkodobé zkoušce

Tento graf dává jen orientační pohled na průběhy krátkodobých zkoušek, protože řezné rychlosti a časy obrábění s těmito rychlostmi se u jednotlivých nástrojů lišily.

3.5 Dlouhodobá zkouška

V druhé části experimentu byla provedena dlouhodobá zkouška všech nástrojů - A, B, C, D. Zkouška probíhala za konstantních podmínek, které byly stanoveny na základě krátkodobé zkoušky. Řezné podmínky jsou uvedeny v tab. 3-14.

v_c [m/min]	f_z [mm]	a_e [mm]	a_p
120 - 125	0,08	0,5	tloušťka desky

Tab. 3-14: Řezné podmínky použité při dlouhodobé zkoušce

Strategie obrábění zůstala stejná jako v první části experimentu. Při dlouhodobé zkoušce byl daný materiál obráběn jednotlivými nástroji stálou řeznou rychlostí. V průběhu obrábění bylo v určitých časových intervalech měřeno opotřebení břitu na hřbetě VB a po dosažení kritériálního opotřebení byla vyhodnocena trvanlivost jednotlivých nástrojů.

Měření opotřebení probíhalo vždy na třech břitech nástroje ve stejné vzdálenosti od čela nástroje obr. 3-18. Výsledná hodnota opotřebení za daný časový interval byla stanovena, jako střední hodnota z opotřebení jednotlivých břítů.



Obr. 3-18: Místo měření opotřebení nástroje

Vzhledem k průběhu krátkodobé zkoušky u jednotlivých nástrojů, byla hodnota kritériálního opotřebení snížena na hodnotu $VB_{krit} = 0,1$ mm.

3.5.1 Nástroj A

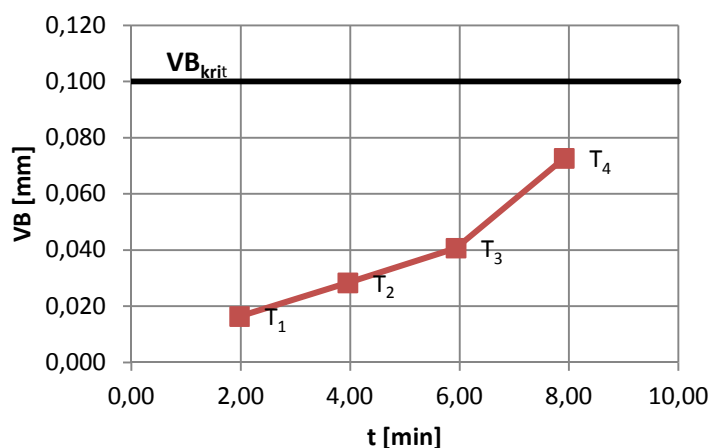


Obr. 3-19: Nástroj A

Nástrojem A (obr. 3-19) byl obráběn materiál za konstantních řezných podmínek. Interval měření opotřebení na hřbetech břitů byl stanoven přibližně na 2 minuty. Naměřené hodnoty opotřebení v průběhu obrábění jsou uvedeny v tab. 3-15.

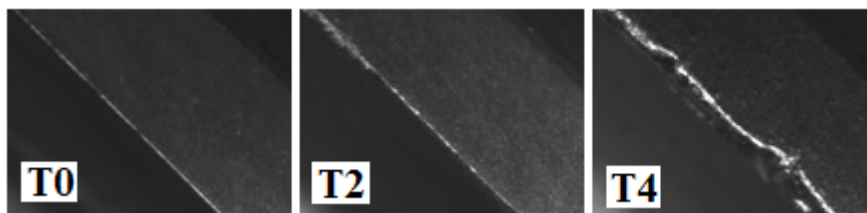
Nástroj A					
	t [min]	VB ₁ [mm]	VB ₂ [mm]	VB ₃ [mm]	VB _{stř} [mm]
T ₁	1,98	0,018	0,013	0,018	0,016
T ₂	3,96	0,03	0,028	0,027	0,028
T ₃	5,93	0,036	0,039	0,047	0,041
T ₄	7,91	0,059	0,08	0,079	0,073
T _K	8,85	-	-	-	-

Tab. 3-15: Naměřené hodnoty opotřebení nástroje A při dlouhodobé zkoušce



Graf 3-11: Závislost opotřebení na čase u nástroje A

V průběhu obrábění se opotřebení rovnoměrně zvyšovalo (graf 3-11), ale zároveň docházelo k nalepování materiálu na břity nástroje. V konečném čase T_K došlo vlivem nalepování třísek k ucpání zubové mezery, které vedlo k prasknutí břitů nástroje. Výsledný stav nástroje je zobrazen na obr. 3-21.



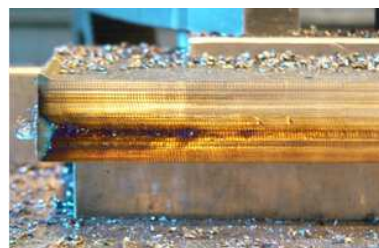
Obr. 3-20: Stav břitu v intervalech měření



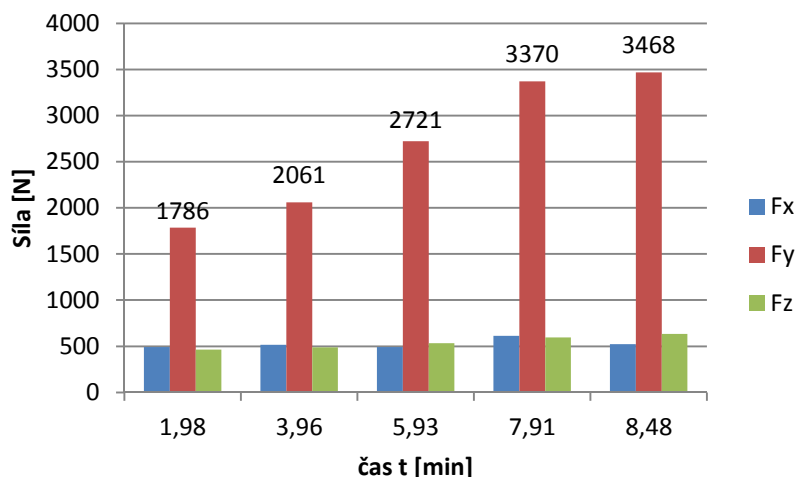
Obr. 3-21: Ucpání zubové mezery - výsledný stav nástroje

Vliv ucpání zubové mezery je patrný i na stavu povrchu obrobku při posledním přejezdu (obr. 3-22), kdy vznikalo vysoké tření a s ním spojený vysoký vývin tepla.

V průběhu frézování byly měřeny řezné síly, jejichž průběh v čase je zobrazen v grafu 3-12. Při posledním přejezdu vzrostla složka řezné síly F_y až nad hodnotu 5000 N.



Obr. 3-22: Stav povrchu po posledním přejezdu



Graf 3-12: Průběh řezných sil při dlouhodobé zkoušce nástroje A

3.5.2 Nástroj B



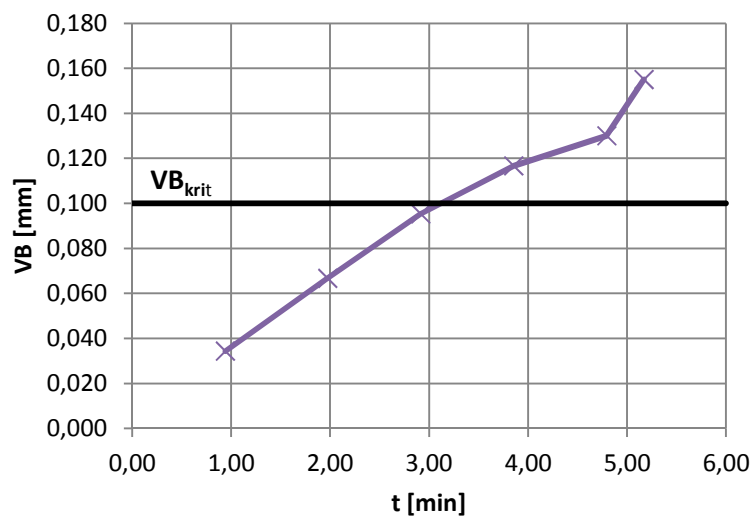
Obr. 3-23: Nástroj B

Pro lepší zachycení průběhu opotřebení byl při použití nástroje B (obr. 3-23) stanoven interval měření opotřebení na 1 min. Hodnoty vzniklého opotřebení jsou uvedeny v tab. 3-16. Čas T_K je konečný čas obrábění, při kterém došlo ke destrukci břitů nástroje.

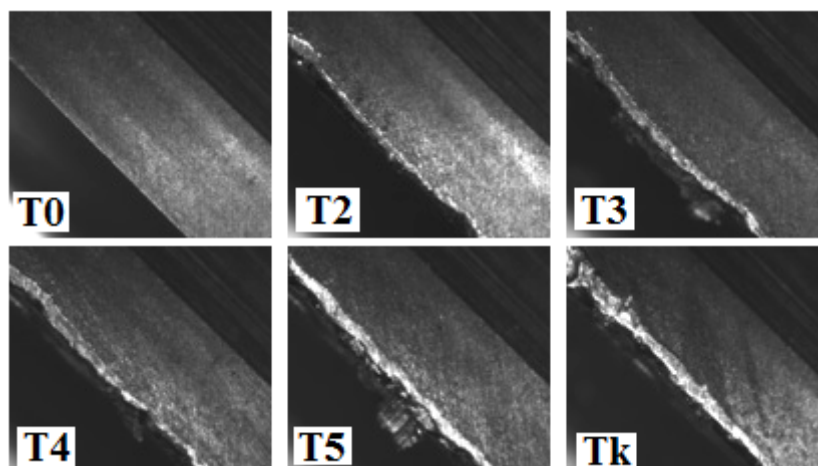
Nástroj B					
	t [min]	VB ₁ [mm]	VB ₂ [mm]	VB ₃ [mm]	VB _{stř} [mm]
T ₁	0,94	0,038	0,032	0,033	0,034
T ₂	1,97	0,07	0,06	0,07	0,067
T ₃	2,91	0,084	0,096	0,106	0,095
T ₄	3,85	0,094	0,13	0,126	0,117
T ₅	4,79	0,12	0,14	0,13	0,130
T _K	5,17	0,144	0,164	0,157	0,155

Tab. 3-16: : Naměřené hodnoty opotřebení nástroje B při dlouhodobé zkoušce

Z průběhu opotřebení (graf 3-13) je patrné, že kritického opotřebení $VB_{krit} = 0,1$ mm na hřbetě břitu bylo dosaženo již po třetí minutě obrábění. Na obr. 3-24 je zachyceno opotřebení břitu 1 v různých časech měření.



Graf 3-13: Závislost opotřebení na čase u nástroje B



Obr. 3-24: Stav břitu 1 v intervalech měření

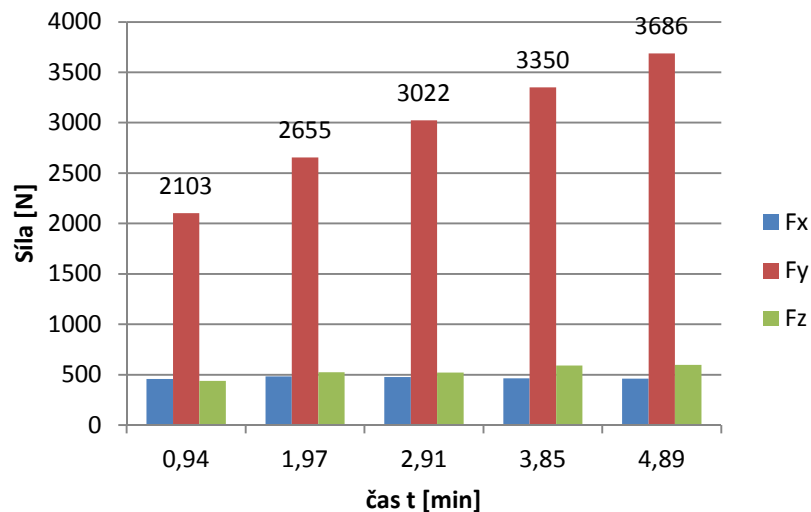
Katedra Technologie Obrábění

Bc. Tomáš Bakša

Přibližně v 5. minutě obrábění bylo dosaženo hodnoty opotřebení 0,15 mm. V průběhu frézování docházelo k nalepování třísek materiálu na břity nástroje. Stejně jako u nástroje A došlo k ucpání zubové drážky (v čase T_k). Nalepený materiál způsobil při obrábění vylomení břitů (obr. 3-25).



Obr. 3-25: Nalepování materiálu na břit, vylámání břitů



Graf 3-14: Průběh řezných sil při dlouhodobé zkoušce nástroje B

3.5.3 Nástroj C



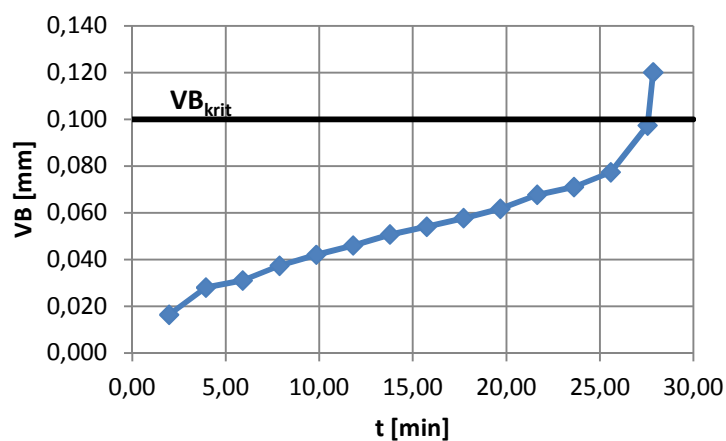
Obr. 3-26: Nástroj C

Interval měření opotřebení na hřbetě byl opět stanoven přibližně na 2 minuty. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 3-17.

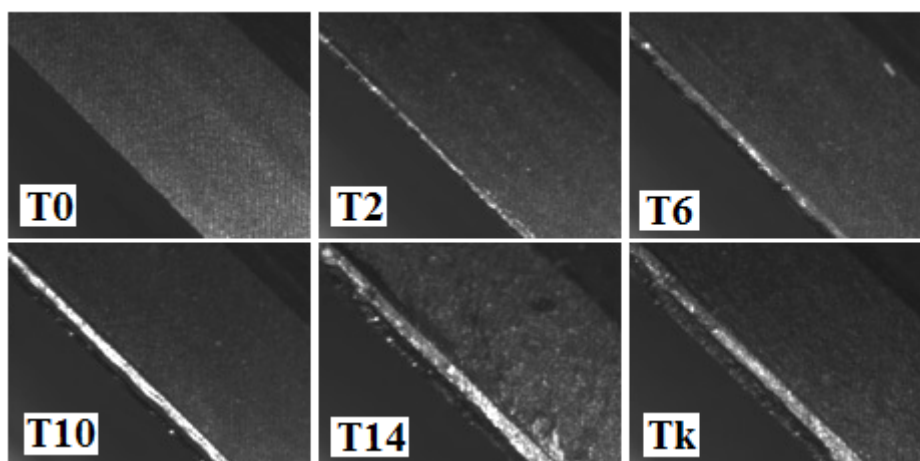
Nástroj C					
	t [min]	VB ₁ [mm]	VB ₂ [mm]	VB ₃ [mm]	VB _{str} [mm]
T ₁	1,97	0,017	0,016	0,016	0,016
T ₂	3,94	0,029	0,03	0,025	0,028
T ₃	5,90	0,031	0,032	0,03	0,031
T ₄	7,87	0,038	0,041	0,033	0,037
T ₅	9,84	0,041	0,045	0,04	0,042
T ₆	11,81	0,046	0,045	0,047	0,046
T ₇	13,78	0,052	0,047	0,053	0,051
T ₈	15,74	0,053	0,052	0,057	0,054
T ₉	17,71	0,055	0,058	0,06	0,058
T ₁₀	19,68	0,062	0,061	0,062	0,062
T ₁₁	21,65	0,067	0,069	0,067	0,068
T ₁₂	23,62	0,07	0,071	0,072	0,071
T ₁₃	25,58	0,077	0,079	0,076	0,077
T ₁₄	27,55	0,099	0,091	0,102	0,097
T _K	27,85	0,127	0,11	0,123	0,120

Tab. 3-17: Naměřené hodnoty opotřebení nástroje C při dlouhodobé zkoušce

Kritické hodnoty opotřebení bylo dosaženo přibližně v čase $t = 27,6$ min. Průběh opotřebení (graf 3-15) byl od čtvrté minuty obrábění téměř lineární až do času přibližně 25 min. Následovalo prudké zvýšení opotřebení a následně ke zničení břitů.

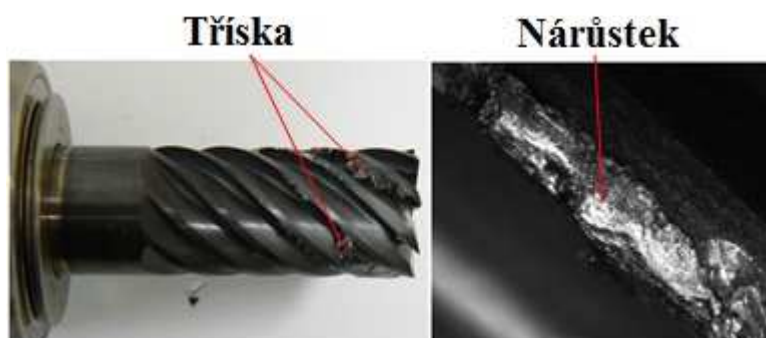


Graf 3-15: Závislost opotřebení na čase u nástroje C

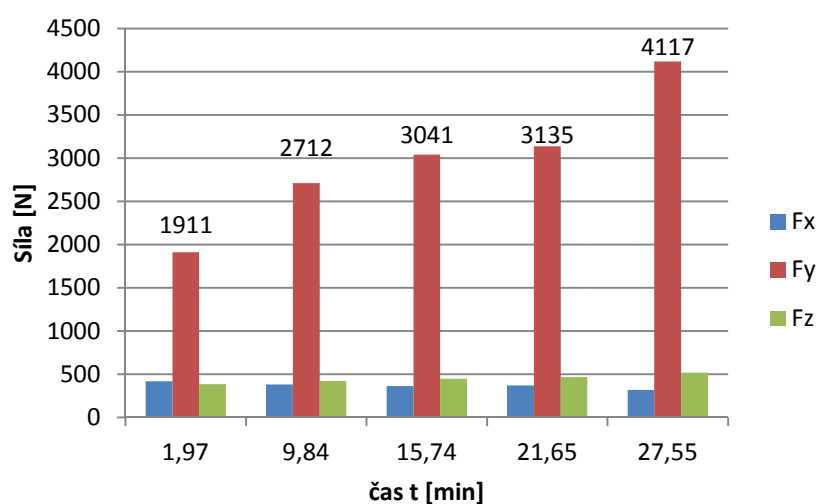


Obr. 3-27: Stav břítu 2 v intervalech měření

Opotřebení na hřbetě břítu 2 během obrábění je znázorněno na obr. 3-27. Před zničením břitů docházelo k tvorbě nárůstků a nalepování třísek na břity nástroje (obr. 3-28).



Obr. 3-28: Nalepování materiálu na nástroj, tvorba nárůstku



Graf 3-16: Průběh řezných sil při dlouhodobé zkoušce nástroje C

3.5.4 Nástroj D

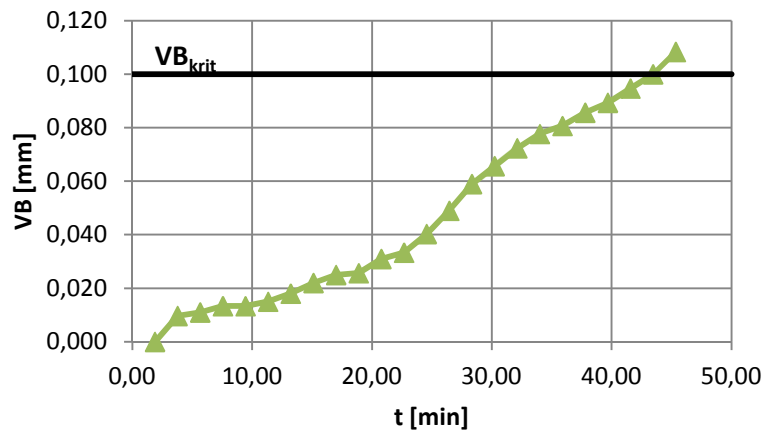
Obr. 3-29: Etalonový nástroj D

Na etalonovém nástroji D (obr. 3-29) bylo měřeno opotřebení v intervalech přibližně 2 min. Naměřené hodnoty jsou v tab. 3-18.

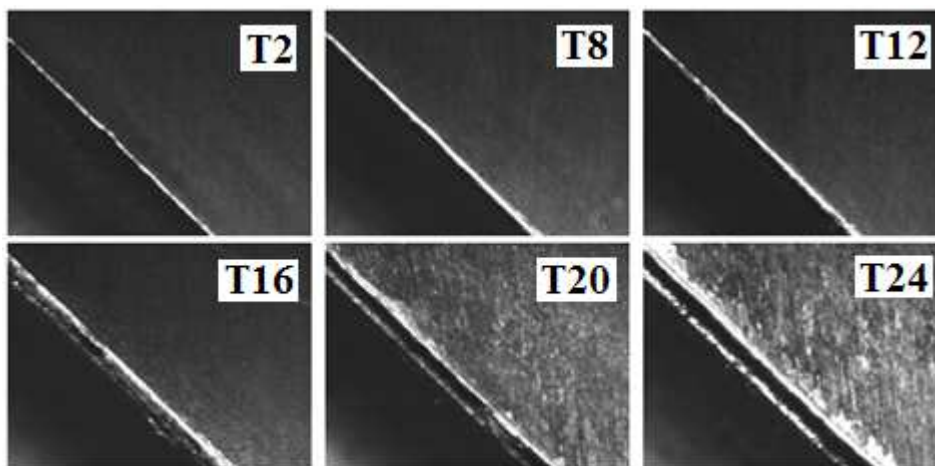
Nástroj D					
	t [min]	VB ₁ [mm]	VB ₂ [mm]	VB ₃ [mm]	VB _{stř} [mm]
T ₁	1,89	0	0	0	0,000
T ₂	3,78	0,011	0,008	0,01	0,010
T ₃	5,67	0,011	0,01	0,012	0,011
T ₄	7,56	0,014	0,012	0,014	0,013
T ₅	9,45	0,014	0,012	0,014	0,013
T ₆	11,34	0,015	0,014	0,016	0,015
T ₇	13,23	0,018	0,017	0,019	0,018
T ₈	15,12	0,022	0,02	0,024	0,022
T ₉	17,01	0,026	0,025	0,024	0,025
T ₁₀	18,90	0,027	0,025	0,025	0,026
T ₁₁	20,79	0,03	0,032	0,031	0,031
T ₁₂	22,68	0,031	0,035	0,034	0,033
T ₁₃	24,57	0,043	0,038	0,04	0,040
T ₁₄	26,46	0,05	0,047	0,05	0,049
T ₁₅	28,35	0,055	0,059	0,063	0,059
T ₁₆	30,24	0,065	0,06	0,072	0,066
T ₁₇	32,13	0,067	0,07	0,08	0,072
T ₁₈	34,02	0,073	0,075	0,085	0,078
T ₁₉	35,91	0,077	0,079	0,086	0,081
T ₂₀	37,80	0,085	0,086	0,086	0,086
T ₂₁	39,69	0,089	0,09	0,089	0,089
T ₂₂	41,58	0,095	0,096	0,093	0,095
T ₂₃	43,47	0,1	0,1	0,1	0,100
T ₂₄	45,36	0,112	0,109	0,104	0,108

Tab. 3-18: Naměřené hodnoty opotřebení nástroje D při dlouhodobé zkoušce

Kritériálního opotřebení na hřbetě břitu 0,1 mm bylo dosaženo v čase t = 43,47 min. Opotřebení rostlo na všech břitech rovnoměrně.

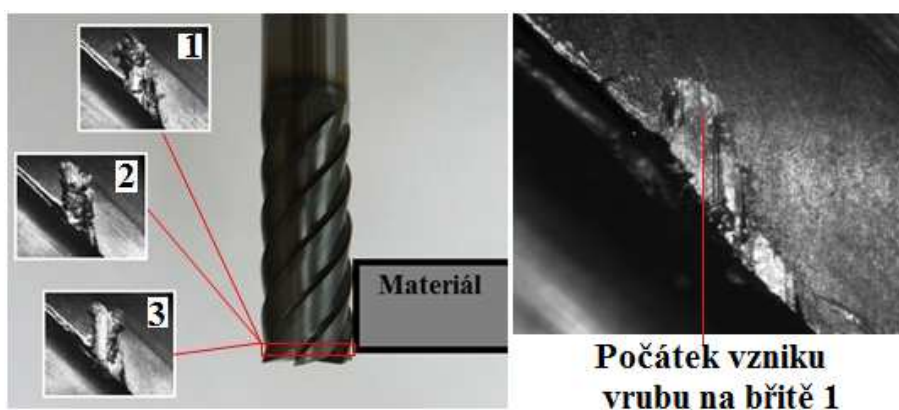


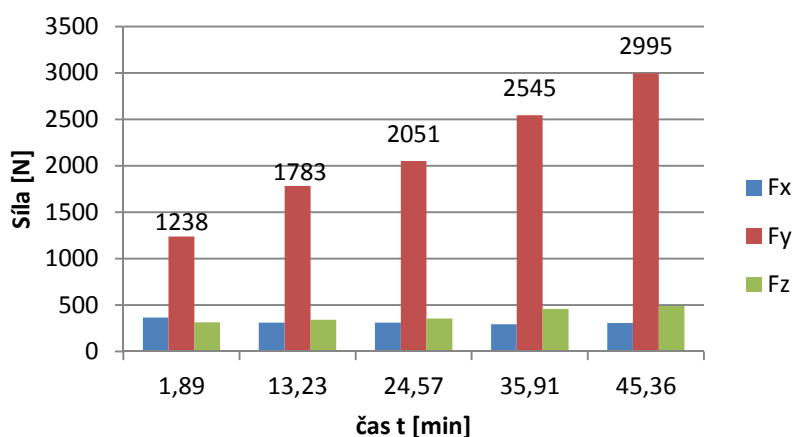
Graf 3-17: Závislost opotřebení na čase u nástroje D



Obr. 3-30: Stav břitu 2 v intervalech měření

V průběhu obrábění docházelo ke vzniku vrubů na všech břitech v místě spodní plochy polotovaru (obr. 3-31). Ke vzniku vrubů došlo přibližně v čase $T_{20} = 37,8$ min. V konečném čase dosahovaly vruby velikosti až 1,2 mm.

Obr. 3-31: Místo vzniku vrubů, vrub na břitu 1 v čase T_{20}



Graf 3-18: Průběh řezných sil při dlouhodobé zkoušce nástroje D

4 Sumarizace a vyhodnocení dosažených výsledků

4.1 Krátkodobá zkouška

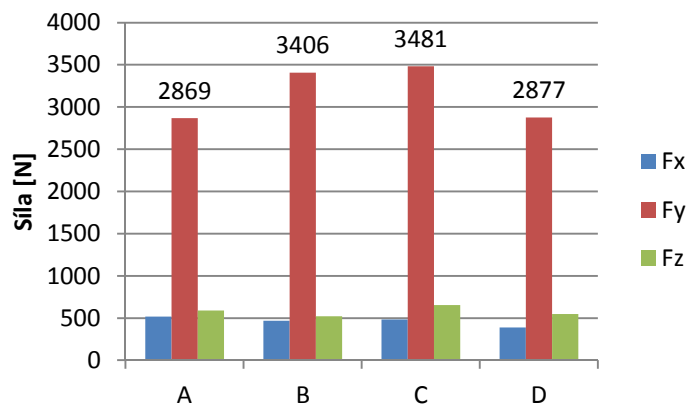
Krátkodobá zkouška měla za cíl nalézt vhodné řezné podmínky pro dlouhodobou zkoušku. Jednotlivými nástroji (A, B, C, D) byl obráběn zadaný materiál při různých řezných rychlostech. V průběhu obrábění bylo měřeno opotřebení na hřbetě VB před každým zvýšením řezné rychlosti. Následně byla vyhodnocena závislost intenzity opotřebení na řezné rychlosti, ze které byla poté stanovena optimální řezná rychlost pro trvanlivost 15 min pro jednotlivé nástroje (tab. 4-1).

	Nástroj A	Nástroj B	Nástroj C	Nástroj D
v_{15} [m/min]	127,65	-	119,68	124,88
VB_{max} [mm]	0,078	0,059	0,125	0,096

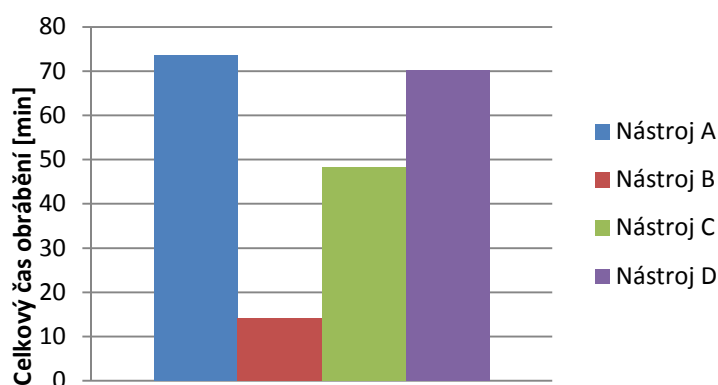
Tab. 4-1: Výsledné řezné rychlosti a opotřebení při krátkodobé zkoušce

U nástroje B nebylo možné vyhodnotit optimální řeznou rychlost v_{15} , protože došlo k vylámaní břitů nástroje při první řezné rychlosti. V tab. 4-1 je rovněž uvedena maximální hodnota opotřebení dosažená během krátkodobé zkoušky u jednotlivých nástrojů.

Čas obrábění nástrojů je zobrazen v grafu 4-2. V průběhu krátkodobé zkoušky byly měřeny i řezné síly. Dominantní složkou řezné síly byla složka F_y , která rostla s rostoucí řeznou rychlostí a časem obrábění. Maximální síly dosažené během krátkodobé zkoušky u jednotlivých nástrojů jsou zobrazeny v grafu 4-1.



Graf 4-1: Nejvyšší naměřené síly při krátkodobé zkoušce



Graf 4-2: Celkový čas obrábění při krátkodobé zkoušce

Celkový čas obrábění a nejvyšší naměřené síly však dávají jen orientační pohled na průběh krátkodobé zkoušky, protože podmínky obrábění se měnily odlišně u jednotlivých nástrojů. Výsledné řezné podmínky, které byly následně použity při dlouhodobé zkoušce jsou v tab. 4-2.

v_c [m/min]	f_z [mm]	a_e [mm]	a_p
120 - 125	0,08	0,5	tloušťka desky

Tab. 4-2: Podmínky použité při dlouhodobé zkoušce

4.2 Dlouhodobá zkouška

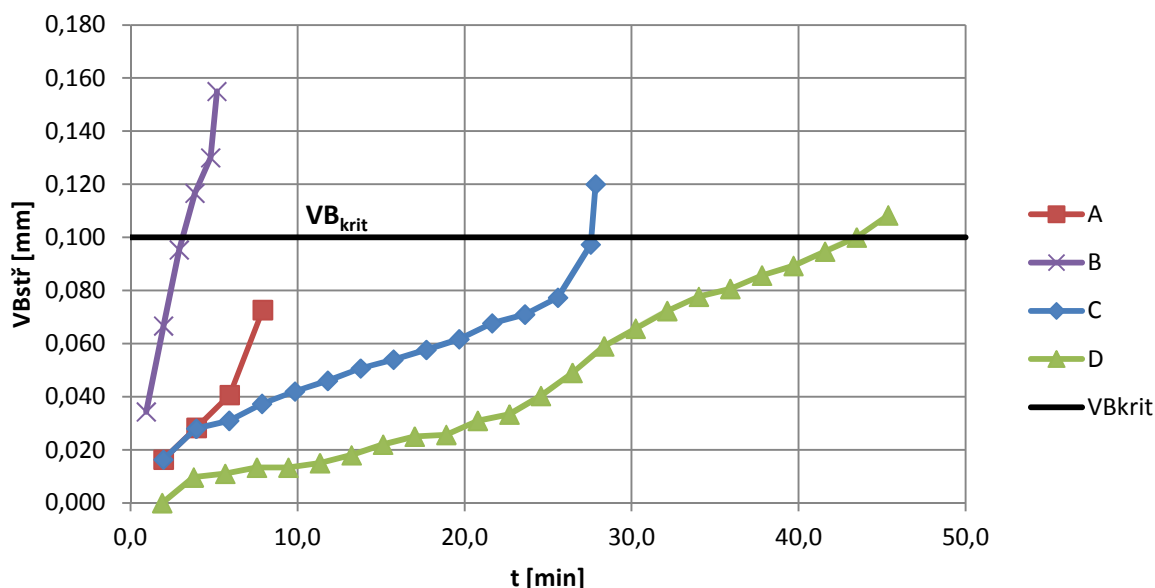
V druhé části experimentu byla provedena dlouhodobá zkouška nástrojů při řezných podmínkách získaných v první části experimentu. Materiál byl postupně obráběn všemi nástroji, a v průběhu bylo měřeno opotřebení na hřbetě břitů VB. Následně byla vyhodnocena trvanlivost nástroje pro zvolené kritériální opotřebení VB_{krit} . Opotřebení bylo měřeno na třech břitech vždy ve stejné vzdálenosti od špičky nástroje.

V tab. 4-3 jsou uvedeny naměřené konečné hodnoty opotřebení jednotlivých nástrojů a jejich celkové časy obrábění. V tabulce je zároveň uvedena trvanlivost nástrojů $T_{0,1}$ při dosažení kritériálního opotřebení.

	Nástroj A	Nástroj B	Nástroj C	Nástroj D
VB_{max} [mm]	0,073	0,155	0,12	0,108
t_{celk} [min]	8,85	5,17	27,85	45,36
$T_{0,1}$ [min]	-	3	27,6	43,5

Tab. 4-3: Hodnoty získané dlouhodobou zkouškou

Nástroj A nedosáhl kritériálního opotřebení, protože došlo k vylámaní jeho břitů. Závislost velikosti opotřebení na čase obrábění je znázorněna v grafu 4-3.

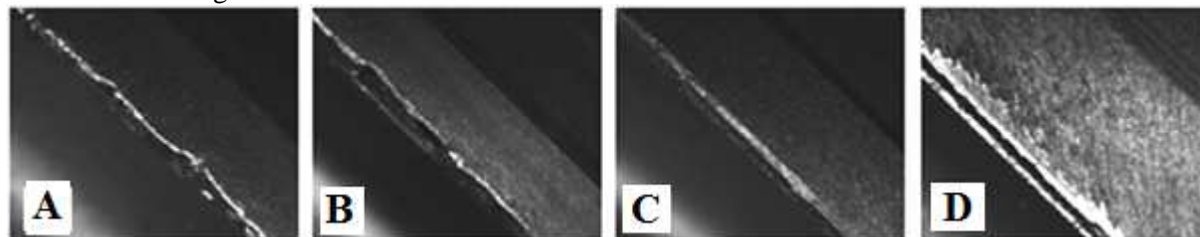


Graf 4-3: Průběhy opotřebení v čase všech nástrojů

Z grafu je patrné, že největší trvanlivosti dosáhl etalonový nástroj D, který dosáhl kritériálního opotřebení v čase 45,36 min. Nástroj D byl jediný z nástrojů, u kterého nedošlo během dlouhodobé zkoušky k vylomení břitů. Velikost opotřebení byla podél břitů rovnoměrná, avšak v místě spodní plochy polotovaru došlo ke vzniku vrubů na všech břitech nástroje. Nástroj D rovněž dosáhl ze subjektivního hlediska nejlepší kvality obrobeného povrchu.

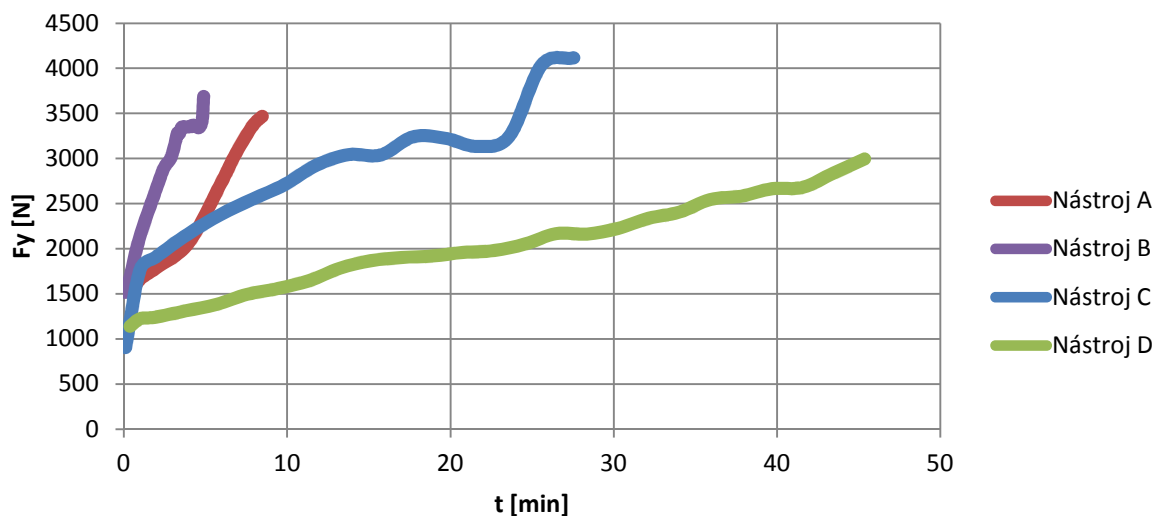
Velký problém při obrábění představovalo nalepování materiálu a třísek na břity nástrojů. To se projevovalo hlavně u nástrojů A, B a C. Tento problém byl příčinou vylamování částí břitů nástroje a tedy i jeho destrukce. Největší tendence k nalepování materiálu na břity vykazovaly nástroje A a B, u kterých došlo k ucpání zubové mezery. U nástroje D k tomu jevu nedošlo, ale to mohlo být způsobeno menším počtem břitů a tedy i větších zubových mezer.

Nejmenší trvanlivost vykazoval nástroj B. V průběhu obrábění se sice dosáhlo velikosti opotřebení až 0,155 mm, avšak k otupení došlo za velmi krátký časový úsek v porovnání s etalonovým nástrojem. Na obr. 4-1 jsou zobrazeny břity jednotlivých nástrojů při dosažení konečného opotřebení.



Obr. 4-1: Konečný stav břítu jednotlivých nástrojů

V průběhu testování byly rovněž měřeny řezné síly během obrábění. Dominantní složkou řezné síly byla u všech nástrojů složka F_y . Velikost této složky s časem obrábění zvyšovala. Průběh této síly u jednotlivých nástrojů je znázorněn v grafu 4-4.

Graf 4-4: Závislost složky F_y v čase obrábění

Z grafu je patrné, že nejnižších hodnot řezných sil dosahoval nástroj D. Složky řezných sil F_x a F_z se v průběhu obrábění měnily jen nepatrně a jejich velikost dosahovala hodnot od 350 do 600 N.

Všechny nástroje vykazovaly ze subjektivního hlediska velký vývin tepla během obrábění, což bylo patrné při vyjmutí nástroje ze stroje během měření opotřebení. Velká teplota nástroje a upínače byla známkou velkých teplot při řezání. Ta byla patrná i během obrábění, zejména při vyšším čase obrábění a tedy i vyšším opotřebení břítu (obr. 4-2).



Obr. 4-2: Žhavé třísky při obrábění

4.3 Ekonomické hodnocení

Všechny nástroje byly testovány na stejném obráběcím stroji, což znamená, že sazba na stroj byla u všech nástrojů stejná. Hodnocení proběhlo z hlediska množství odebraného materiálu během obrábění.

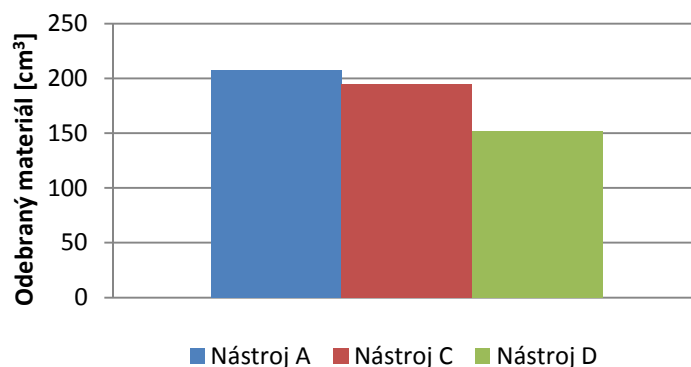
4.3.1 Ekonomické hodnocení krátkodobé zkoušky

Krátkodobou zkouškou byla určena řezná rychlost pro trvanlivost 15 min. Pokud by se předpokládalo, že při této rychlosti by nástroj skutečně obráběl po dobu 15 minut, výsledné množství odebraného materiálu by bylo u jednotlivých nástrojů následující:

$$Q = \frac{v_c \cdot f_z \cdot z \cdot a_p \cdot a_e \cdot 1000}{\pi \cdot D} \cdot T \text{ [mm}^3\text{]}$$

Nástroj	A	B	C	D
v_{15} [m/min]	127,65	-	119,68	124,88
Q [cm ³]	207,21	-	194,29	152,05

Tab. 4-4: Množství odebraného materiálu při optimální řezné rychlosti při čase obrábění 15 min



Graf 4-5: Množství odebraného materiálu při optimální řezné rychlosti při čase obrábění 15 min

Katedra Technologie Obrábění

Bc. Tomáš Bakša

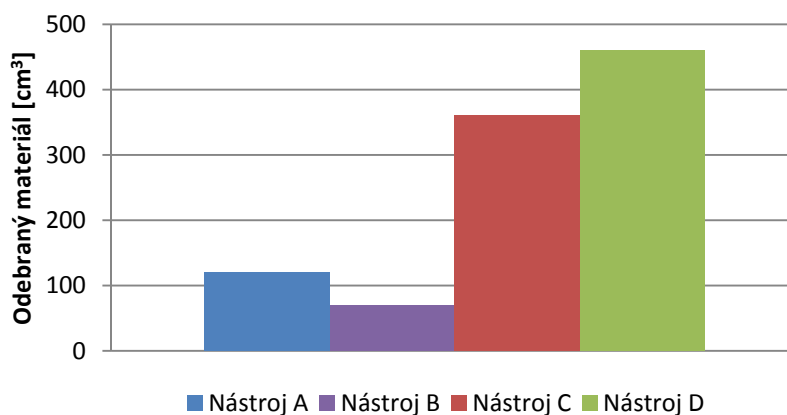
Vzhledem k tomu, že není známa cena jednotlivých nástrojů, není možné ekonomicky zhodnotit množství odebraného materiálu. Pokud by byla známa cena nástrojů bylo by možné vypočítat cenu na jednotku objemu odebraného materiálu u jednotlivých nástrojů.

4.3.2 Ekonomické hodnocení dlouhodobé zkoušky

Množství odebraného materiálu během dlouhodobé zkoušky je zobrazeno v tab. 4-5. Tabulka uvádí rovněž celkovou ujetou dráhu jednotlivých nástrojů s.

Nástroj	A	B	C	D
t [min]	8,85	5,17	27,85	45,36
Q [cm ³]	119,72	69,94	360,78	459,86
s [m]	14,1	8,25	42,45	54

Tab. 4-5: Množství odebraného materiálu a ujetá dráha nástroje při dlouhodobé zkoušce



Graf 4-6: Množství odebraného materiálu při dlouhodobé zkoušce

Je zřejmé, že nejvyššího času obrábění dosáhl etalonový nástroj D a tedy odebral i nejvíce materiálu. Pokud by byly k dispozici ceny jednotlivých nástrojů, bylo by možné vypočítat cenu na jednotku množství odebraného materiálu u jednotlivých nástrojů, a stanovit výhodnost, resp. nevýhodnost nástrojů.

5 Závěr

Tato diplomová práce se zabývala problematikou obrábění tvrdých materiálů, konkrétně kalených ocelí. Cílem bylo porovnat trvanlivosti čtyř zadaných nástrojů při obrábění kalené oceli ČSN 19 436. Nástroje byly monolitní frézy ze slinutého karbidu s průměrem 16 mm. Etalonový nástroj měl 6 břitů, zatímco zbylé tři nástroje měly 8 břitů. Nástroje se od sebe lišily rozdílným substrátem slinutého karbidu, geometrií i deponovanou tenkou vrstvou. Vzhledem k mnoha rozdílnostem nástrojů bylo cílem experimentu porovnat jednotlivé nástroje z komplexního pohledu.

Experiment probíhal ve dvou částech, kdy v první části byla provedena krátkodobá zkouška dle A. S. Kondratova s první sadou nástrojů. Výsledkem krátkodobé zkoušky byly hodnoty optimální řezné rychlosti pro trvanlivost 15 minut pro jednotlivé nástroje. Na základě těchto údajů byly stanoveny řezné podmínky pro druhou část experimentu - dlouhodobou zkoušku. Dlouhodobá zkouška probíhala u jednotlivých nástrojů za neměnných řezných podmínek. V průběhu obrábění bylo měřeno opotřebením na hřbetě břitu VB ve stanovených časových intervalech. Následně bylo u jednotlivých nástrojů vyhodnocen průběh opotřebením v čase a trvanlivost nástrojů pro zadané kritériální opotřebením.

Nevyšší trvanlivosti dosáhl etalonový nástroj, který měl v porovnání s nejhůře vyhodnoceným nástrojem až pětinasobnou trvanlivost. Velký problém během obrábění způsobovalo nalepování materiálu a třísek na břity nástroje, které mělo v mnoha případech za následek vylámaní částí břitů nástroje. V průběhu zkoušky byly měřeny i řezné síly, jejíž dominantní složkou byla F_y , která se s časem obrábění a růstem opotřebením zvyšovala. Ostatní složky řezné síly byly několikanásobně nižší a v průběhu obrábění se téměř neměnily.

Volbou správného speciálního nástroje, správných řezných podmínek a strategie obrábění lze docílit efektivního obrábění tvrdých kalených ocelí a zvýšit tak produktivitu a kvalitu obráběcího procesu.

Výsledky toho experimentu mají posloužit k dalšímu výzkumu a vývoji nástrojů v oblasti obrábění tvrdých materiálů.

6 Seznam použité literatury

- [1] ŠVARC, Vojtěch. *Obrobitelnost materiálů kategorie b*. Plzeň, 2011. Bakalářská práce. ZČU v Plzni.
- [2] ŠEBELA, Radek. *Obrábění těžkoobrobitelných materiálů*. Brno, 2012. Bakalářská práce. VUT v Brně.
- [3] ZÝKA, Stanislav. *Obrábění oceli o vyšší tvrdosti kulovou frézou*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. ZČU v Plzni. [cit. 2013-11-15]
- [4] POPOV, Alexey. *Přednáška z předmětu Teorie obrábění*. TU v Liberci. [online]. Dostupný z WWW: <http://www.technomat.cz/data/katedry/kom/KOM_TO_PR_13_CZE_Popop_Obrobitelnost_materialu_a_rezivost_reznych_nastroju.pdf>
- [5] ČEP, Robert. *Přednáška z předmětu Experimentální metody obrábění*. VŠB TU Ostrava. [online] [cit. 2013-11-15]. Dostupný z WWW: <http://home1.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_06.pdf>
- [6] ČEP, Robert. *Přednáška z předmětu Experimentální metody obrábění*. VŠB TU Ostrava. [online]. Dostupný z WWW: <http://home1.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_07.pdf>
- [7] ŘEHOŘ, Jan. *Přednášky z předmětu Teorie obrábění*. ZČU v Plzni.
- [8] ZETEK, Miroslav. *Přednášky z předmětu Speciální technologie*. ZČU v Plzni. [cit. 2014-02-07]
- [9] KRÍŽ, Antonín. *Přednášky z předmětu Materiály v obrábění*. ZČU v Plzni. [cit. 2014-02-08]
- [10] SANDVIK Coromant. *Skupiny obráběných materiálů*. [online]. Dostupný z WWW: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/workpiece_material_groups>
- [11] BUKÁČEK, Zdeněk. *Technologie obrábění tvrdých materiálů nástroji s definovanou geometrií břitu*. Brno, 2009. Diplomová práce. VUT v Brně. [cit. 2014-03-10]
- [12] TUMLIKOVO. [online]. Dostupný z WWW: <<http://www.tumlikovo.cz/rozdeleni-nastrojovych-oceli/>>
- [13] URBAN, Marek. *Konstrukce speciálního frézovacího nástroje pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů*. Plzeň, 2011. Diplomová práce. ZČU v Plzni. [cit. 2014-03-10]
- [14] ŠVARC, Vojtěch. *Preparace břitu monolitních fréz pomocí vlečného omílání*. Plzeň, 2013. DIPLOMOVÁ PRÁCE. ZČU v Plzni. [cit. 2014-02-03]
- [15] MALÝ, Josef. *Úprava a měření mikrogeometrie břitu nástroje*. Plzeň, 2012. Bakalářská práce. ZČU v Plzni.
- [16] EMUGE Franken. [online] [cit. 2014-02-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.emugefranken.cz/index.php?menu=85>>
- [17] MM Průmyslové spektrum. *Zakrojit do tvrdého - odolné nástroje pro obrábění*. [online] [cit. 2014-02-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.cnckonstrukce.cz/novinka-121/zakrojit-do-tvrdeho-odolne-nastroje-pro-obrabeni.html>>

Katedra Technologie Obrábění

Bc. Tomáš Bakša

- [18] SANDVIK Coromant. *CoroMill Plura*. [online] [cit. 2014-02-12]. Dostupný z WWW: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/coromill_plura>
- [19] MM Průmyslové spektrum. *Obrábění kalených ocelí*. [online] [cit. 2014-03-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-kalenyh-oceli.html>>
- [20] MM Průmyslové spektrum. *Hybridní monolitní fréza ze slinutého karbidu*. [online] [cit. 2014-03-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/hybridni-monolitni-freza-ze-slinuteho-karbidu.html>>
- [21] PILEČKOVÁ, Zuzana. *Vliv kvality břitu čelní válcové frézy na trvanlivost při obrábění nástrojové oceli*. Plzeň, 2009. Diplomová práce. ZČU v Plzni. [cit. 2014-03-18]
- [22] RAJŠPÍS, Vlastimil. *Vliv tenkých vrstev cermetové VBD na trvanlivost a drsnost obrobeného povrchu při frézování těžkoobrobitelných materiálů*. Plzeň, 2010. Diplomová práce. ZČU v Plzni.
- [23] GARANT. *Příručka obrábění*. [online] [cit. 2014-03-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.hoffmann-group.com/cz/kompetence-v-oblasti-servisu/stahovani-souboru/prirucka-obrabeni.html>>
- [24] SHM. *TripleCoating Cr*. [online] [cit. 2014-05-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.shm-cz.cz/pvd-povlaky-a-sluzby/pvd-povlaky/triplecoatings-cr/>>
- [25] CEMECON. *Tvrký, tvrdší, HSN²*. [online] [cit. 2014-05-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.cemecon.cz/povlakovani/hsn2.aspx>>
- [26] Oerlikon Balzers. *Obrábění nejtvrdší oceli rychle a bezpečně*. [online] [cit. 2014-05-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.oerlikonbalzerscoating.com/bcz/cze/01-products-services/02-balinit-coatings/035-balinit-aldura/indexW3DnavidW261.php>>
- [27] Katalog povlaků PLATIT. [online] [cit. 2013-11-15] [cit. 2014-05-01]. Dostupný z WWW: <http://www.liss.cz/files/katalog_povlaku.pdf>

7 Přílohy

7.1 Charakteristika obráběného materiálu

Ocel 19 436

Značení oceli dle norem		
W. Nr.	DIN	ČSN
1.2080	X210Cr12	19 436

Tab. 7-1: Značení oceli dle norem

Charakteristika oceli:

Vysoce legovaná chromová ocel vyznačující se vysokou odolností proti opotřebením a velkou prokalitelností. Ocel rovněž vykazuje dobrou stálost rozměrů při tepelném zpracování a vysokou pevnost v tlaku. Nevýhodou je náchylnost materiálu ke karbidické řádkovitosti a nižší houževnatost. ocel má také sníženou obrobiteľnosť.

Ocel se používá na velmi namáhané formy, nebo díly forem s velkou životností pro tváření plastů. Dále se využívá na nástroje pro drcení a mletí s velkým nárokem na odolnost proti opotřebením. Z oceli se rovněž vyrábějí nástroje pro tváření za studena, jako jsou například lisovadla, protlačovadla, tlačné trny nebo závitové válce.

Chemické složení:

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
1,80-2,05	0,20-0,45	0,20-0,45	Max 0,030	Max 0,035	11,0-12,5	Max 0,50

Tab. 7-2: Chemické složení oceli ČSN 19 436

Mechanické a fyzikální vlastnosti:

Minimální tvrdost:	61 HRC
Hustota[kg/m ³]:	7 710
Obrobiteľnosť (frézování):	9b
Třída odpadu dle ČSN 42 0030:	006
Teploty přeměn:	Ac1 ~ 800-830 °C, Ms ~ 330°
Mez kluzu Re [MPa]:	1649 ±16
Mez kluzu v tlaku Ret [MPa]:	2 700 – 3 000 (při tvrdosti 57-64 HRC)
Mez pevnosti Rm [MPa]:	1798 ± 50
Pevnost v ohybu Rmo [MPa]:	~ 3800 (při tvrdosti 62 HRC)
Tepelná vodivost λ [W/m.K]:	30
Svařitelnost:	obtížná
Teplotní součinitel roztažnosti α:	12·10 ⁻⁶ K ⁻¹
Tažnost A5 [MPa]:	0,5 ± 0,1

Tab. 7-3: Mechanické a fyzikální vlastnosti oceli ČSN 19 436

7.2 Použité stroje a zařízení

7.2.1 CNC frézovací centrum MCV 750A

Vertikální obráběcí centrum s třemi CNC řízenými osy.



Obr. 7-1: CNC frézovací centrum MCV 750A

Technické parametry stroje:

Rozměr stroje [mm]:	3700 x 2200 x 2735
Zdvih v ose X, Y, Z [mm]:	750, 500, 500
Jmenovitý výkon vřetena [kW]:	16
Max. otáčky vřetena [ot/min]:	13000
Rozměry upínacího stolu [mm]:	1000 x 500
Pracovní posuvy X, Y, Z [m/min]:	1 - 15
Rychloposuvy X, Y, Z [m/min]:	25
Řídící systém:	Heidenhein TNC 426
Počet míst v zásobníku:	24

Tab. 7-4: Technické parametry stroje MCV 750A

7.2.2 Dynamometr KISTLER 9225 A

Tří-složkový dynamometr pro frézování KISTLER 9225 A snímá tři vzájemně kolmé síly pomocí piezoelektrických krystalů Si. Výstupní náboj z dynamometru je pomocí měniče přeměněn na elektrické napětí a pomocí zesilovače zesílen dle potřeby.



Obr. 7-2: Dynamometr KISTLER 9225 A

Technické údaje dynamometru:

Rozsah ve směru X [kN]:	-20 až 20
Rozsah ve směru Y [kN]:	-20 až 20
Rozsah ve směru Z [kN]:	-10 až 40
Dovolená provozní teplota [°C]:	0 až 70
Vlastní frekvence [kHz]:	3
Chyba měření [%]:	1
Citlivost:	8 pC/N
Spojovací kabel se zesilovačem:	1687A5

Tab. 7-5: Technické údaje dynamometru KISTLER 9225 A

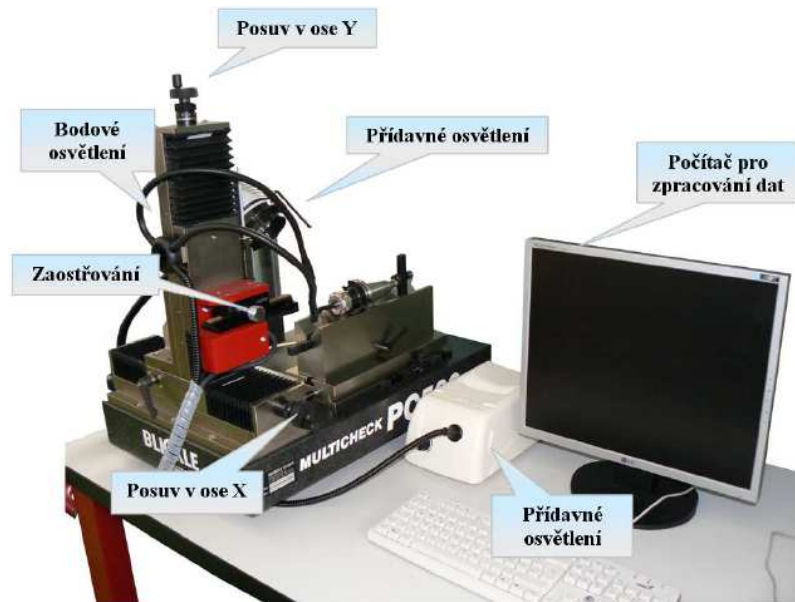
Příslušenství k dynamometru:

- Zesilovač KISTLER 5007 (1)
- Sběrná karta DAQCard-6062E (2)
- PC se softwarem pro vyhodnocení sil (3)



Obr. 7-3: Příslušenství k dynamometru KISTLER 9225 A

7.2.3 Optický mikroskop Multicheck PC500



Obr. 7-4: Mikroskop Multicheck PC500

Základní charakteristika:

- výrobce - Güehring Machinebau GMBH
- horizontální provedení
- možnost měření:
 - opotřebení rotačních i nerotačních nástrojů
 - vzdálenosti (např. velikosti opotřebení bříty)
 - úhlů
- možnost nastavení nástroje pod úhel
- přesnost 0,001 μm
- rozsah v ose X i Y: 0 až 150 mm
- vybavení:
 - software WMS
 - vyměnitelné objektivy se zvětšením 10x, 30x, 75x a 150x

7.2.4 Měřicí přístroj Alicona Infinite focus



Obr. 7-5: Měřicí přístroj Alicona Infinite focus

Optický 3D měřicí přístroj Alicona Infinite focus slouží k měření a zjišťování kvality v oblasti mikro a nano rozsahu. Přístroj je vhodný pro studium povrchu materiálu, protože umožňuje měření geometrie se strmými boky, povrchů s vysoce reflexními vlastnostmi i drsnost povrchu a to s vertikálním rozlišením až 10 nm. 3D měření se provádí přímo v optickém obrazu. Přístroj poskytuje všechny funkce pro měření rozměrů, povrchové analýzy a charakterizace.

Princip mikroskopu Infinite focus je založen na změně ohniskové vzdálenosti. Kombinuje malou hloubku ostrosti optického systému při vertikálním pohybu a změnu topografické a barevné informace při změně zaostření. Tyto informace jsou pak pomocí algoritmů přeneseny do formy 3D dat s přesným topografickým umístěním.

S přístrojem je možné měřit:

- nástrojové úhly (úhel čela, úhel hřbetu, úhel břitu)
- zaoblení řezné hrany
- drsnost povrchu
- drsnost povrchu řezné hrany

Přístroj není citlivý na pracovní prostředí, nepotřebuje dodatečné stínění světla z okolí. Výstupní data měření mohou být graficky zobrazena na obrazovce, nebo automaticky vytištěna v podobě protokolu.