



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TESTOVÁNÍ VYBRANÉHO FRÉZOVACÍHO NÁSTROJE PRO OBRÁBĚNÍ VYSOCE KALENÝCH OCELÍ

TESTING OF CHOSEN MILLING TOOL FOR MACHINING OF HARDENED STEELS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Talaš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Jan Talaš**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Testování vybraného frézovacího nástroje pro obrábění vysoce kalených ocelí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se bude zabývat testováním řezného nástroje určeného pro obrábění specifických ocelí (vysoce kalených ocelí). Teoretická část práce bude zaměřena na charakteristiku technologie frézování, analýzu řezného nástroje včetně jeho forem opotřebení a na rozbor materiálu obrobku. Praktická část práce se bude zabývat testováním frézovacího nástroje při konkrétních řezných podmínkách. Práce bude ukončena technicko-ekonomickým zhodnocením, které bude doplněno o výsledné doporučení řezných podmínek pro danou operaci obrábění.

Cíle bakalářské práce:

1. Teoretická část (technologie frézování, charakteristika řezného nástroje a jeho forem opotřebení, popis testovaného materiálu).
2. Experimentální část (testování frézovacího nástroje – sběr dat, porovnání, vyhodnocení).
3. Technicko-ekonomické zhodnocení.

Seznam literatury:

PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. CERM 1. vyd. 246 s. 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.

AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ, s.r.o. Příručka obrábění-kniha pro praktiky. Přel. KUDELA, M. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-972299-4-6.

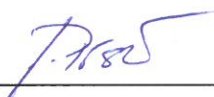
AB SANDVIK COROMANT. Produktivní obrábění kovů. Sandvik Coromant, technické vyd. Švédsko: CMSE, 1997. 300 s. S-811 81 Sandviken, Švédsko.

KOCMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, 2002. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.

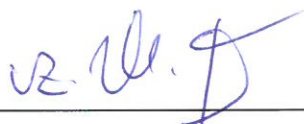
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 4. 11. 2016





prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá testováním frézovacího nástroje a určením vhodných řezných podmínek pro obrábění. První část je zaměřena na teoretický úvod do problematiky frézování, opotřebení a povlakování nástrojů. Je zde také vysvětlen termín vysoce kalená ocel. Další část práce je prakticky zaměřena a jsou v ní graficky a číselně vyhodnoceny experimentálně zjištěné hodnoty. V poslední části je počítána ekonomika obrábění.

Klíčová slova

šířka otupení, řezná rychlost, frézování, frézovací nástroj, vysoce kalená ocel, ekonomika obrábění

ABSTRACT

This Bachelor thesis studies the testing of a milling tool and the determination of appropriate cutting conditions for machining. The first part of the thesis focuses on the theoretical introduction to milling, end mill wear, and coating. It also explains the term high-hardened steel. The next part is practically oriented and involves graphical and numerical evaluation of measured values. The last part deals with the machining economy.

Key words

the width of the wear, cutting speed, milling, milling tool, high-hardened steel, machining economy

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TALAŠ, Jan. *Testování vybraného frézovacího nástroje pro obrábění vysoce kalených ocelí*. Brno 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 41 s. 9 příloh. doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Testování vybraného frézovacího nástroje pro obrábění vysoce kalených ocelí** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

20. 5. 2017

Jan Talaš

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu své bakalářské práce doc. Ing. Josefu Sedlákovi, Ph.D. a Ing. Petře Sliwkové, Ph.D. za jejich čas a ochotu při poskytování cenných rad a připomínek během konzultací. Dále děkuji vedení a zaměstnancům společnosti Ing. Zdeněk Krátký za nezbytné informace, užitečná doporučení a možnost vypracování této práce.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH	7
ÚVOD	9
1 TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ	10
1.1 Definice frézování	10
1.2 Základní dělení	11
1.3 Základní pojmy	12
Řezná rychlost – v_c [m/min]	12
Otáčky vřetene – n [min^{-1}]	12
Posuv na zub – f_z [mm]	13
Hloubka řezu – a_p [mm]	13
Šířka řezu – a_e [mm]	13
1.4 Nástroj pro frézování	13
1.5 Upínání nástrojů	14
Frézy nástrčné	14
Frézy s válcovou stopkou	15
Frézy s kuželovou stopkou	16
1.6 Frézovací stroje	16
Stolové frézky	16
Rovinné frézky	16
Speciální frézky	17
2 FORMY OPOTŘEBENÍ ŘEZNÉHO FRÉZOVACÍHO NÁSTROJE	18
Nadměrné opotřebení hřbetu břitu – tab. 2.1	18
Opotřebení ve tvaru vrubu na břitu – tab. 2.2	18
Vylamování břitu – tab. 2.3	19
Tvorba nárůstku – tab. 2.4	19
Kráterové opotřebení ve tvaru žlábků – tab. 2.5	19
Plastická deformace břitu – tab. 2.6	20
Tepelné trhliny – tab. 2.7	20
3 POVLAKY	21
Povlaky CVD	21
Povlaky PVD	21
4 VYSOCE KALENÁ OCEL	22
5 PROFIL SPOLEČNOSTI ING. ZDENĚK KRÁTKÝ	23

6	TESTOVÁNÍ FRÉZOVACÍHO NÁSTROJE	24
6.1	Popis testu.....	24
6.2	Vyhodnocení.....	24
6.3	Průběh testu	24
6.4	Volba testovaného nástroje.....	25
6.5	Podmínky pro obrábění	27
6.6	Hledání vhodné řezné rychlosti	27
6.7	Výpočty zkoumaných parametrů.....	32
7	TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	33
7.1	Číselné vyhodnocení provedených řezných zkoušek	33
7.2	Grafické vyhodnocení nákladů na obrábění	35
7.3	Diskuze dosažených výsledků.....	35
	ZÁVĚR.....	36
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	37
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ.....	39
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	40
	SEZNAM PŘÍLOH	41

ÚVOD

Technologický vývoj ve strojírenství je velmi dynamický. Aby bylo možné vyrábět konkurenceschopné nástroje, je třeba se o tento vývoj zajímat a pečlivě ho sledovat. Určujícími parametry vhodného nástroje jsou zejména jeho výkon, trvanlivost a kvalita obrobeneho povrchu.

Trvanlivost nástroje určuje, zda je daný nástroj schopen obrábět konkrétní materiál tak, aby bylo dosaženo požadované kvality povrchu. Výkon nástroje podává informaci o tom, jakou rychlostí je schopen odebírat objem materiálu.

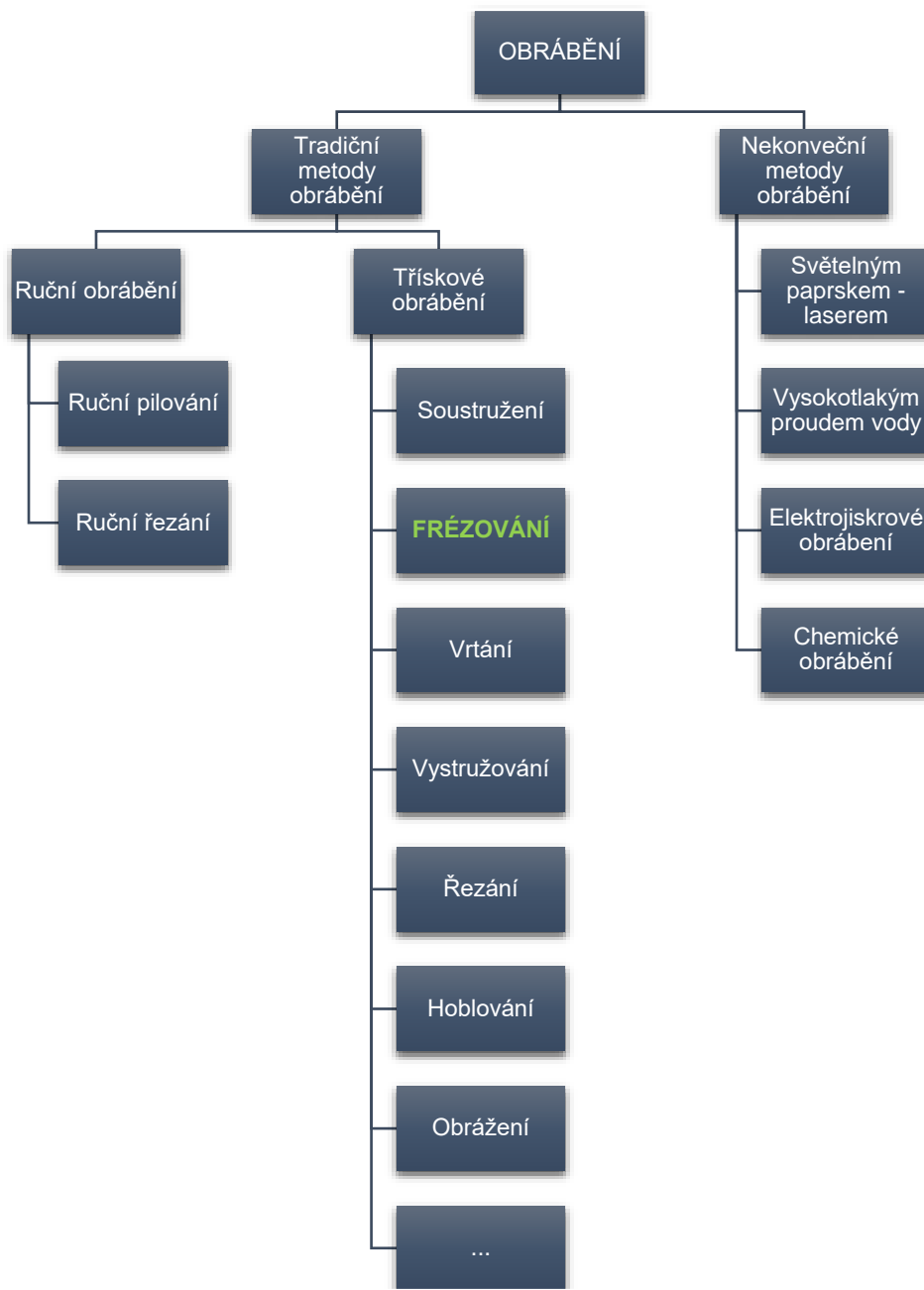
Práce má experimentální charakter. Jejím předmětem je testování konkrétního nástroje pro frézování. Tento nástroj je produktem podniku, ve kterém byl samotný test vykonán. Výsledkem experimentu by mělo být doplnění doporučených řezných podmínek pro konkrétní aplikaci testovaného nástroje, které jsou uvedeny v katalogu nástrojů poskytovaném společností Ing. Zdeněk Krátký.

Vybraný frézovací nástroj je nabízen ve dvojím provedení – se dvěma různými povlaky. Pro vyhodnocení vhodnosti lepšího z nich pro obrábění specifického materiálu – vysoce kalené oceli – je nahlíženo ze dvou kritérií. Jedním z nich je životnost/trvanlivost nástroje a tím druhým je ekonomika obrábění. Není totiž zaručeno, že nástroj, který vydrží pracovat déle, bude pracovat výhodněji i z finančního hlediska. Tento přístup byl použit i při výběru vhodné řezné rychlosti pro frézování vysoce kalených ocelí.

Životnost/trvanlivost nástroje je posuzována dle velikosti šířky otupení na hřbetu nástroje. Po překročení hraniční hodnoty není nástroj schopen pracovat tak, jak se od něj očekává. Hodnoty hraničního opotřebení se obecně liší zejména dle geometrie nástroje. Velikost těchto opotřebení je měřena nejmodernějšími CNC měřicími stroji.

1 TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ

Technologie frézování je považována za tradiční metodu obrábění, která spadá do kategorie třískového obrábění. To znamená, že k úběru materiálu dochází působením břitu nástroje, který vniká do materiálu a ten odděluje formou třísky. Zařazení technologie frézování mezi metody obrábění lze vidět na obr. 1.



Obr. 1.1 Schématické rozdělení metod obrábění [1].

1.1 Definice frézování

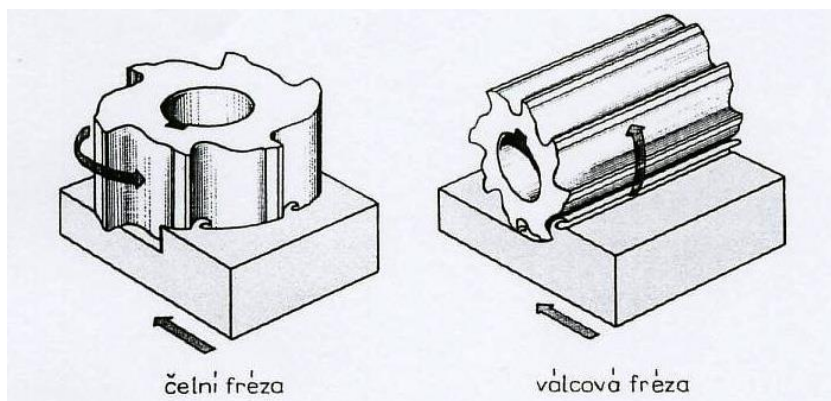
Frézování je metoda obrábění, kdy je materiál odebrán vícebřitým rotujícím nástrojem. Otáčející se nástroj koná hlavní pohyb. Vedlejší pohyb (posuvný) vykonává obrobek. K posuvu nejčastěji dochází v rovině kolmé na osu rotace nástroje (stolní frézka). U moderních

obráběcích center je posuvný pohyb plynule měnitelný a lze jej realizovat ve více osách zároveň (víceosé CNC frézky). Nástroj pro frézování se nazývá fréza, frézovací stroj frézka. Fréza má obvykle více zubů a každý zub odebírá určité množství materiálu. Řezný proces je tedy přerušovaný [2].

1.2 Základní dělení

Jsou rozeznávány dva základní druhy frézování (obr. 1.2):

- **čelní** – čelem frézy,
- **válcové** – obvodem frézy.

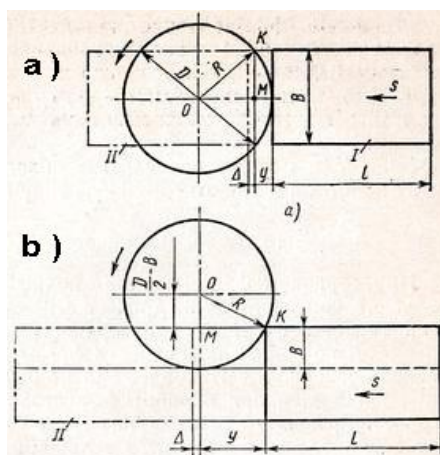


Obr. 1.2 Frézování čelní a válcové [3].

Čelní frézování je realizováno břity, které jsou umístěny po obvodu nástroje, společně s vedlejšími břity na čele. Osa frézy a obráběné plochy jsou na sebe navzájem kolmé [2].

Podle vzájemné polohy frézy a obrobku se čelní frézování dělí na (obr. 1.3):

- **symetrické,**
- **nesymetrické.**

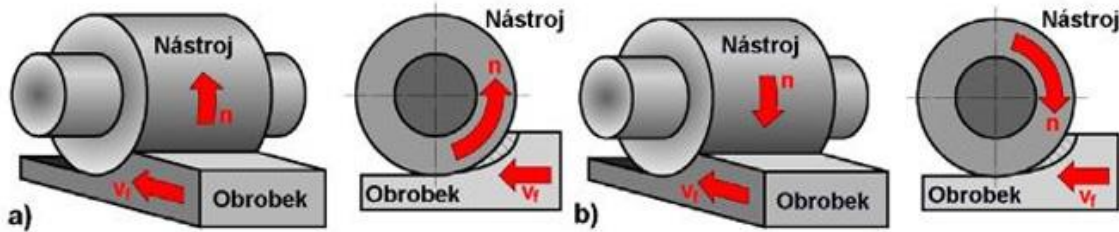


Obr. 1.3 Čelní frézování [6]: a) symetrické, b) nesymetrické.

U válcového frézování jsou břity umístěny po obvodu nástroje. Osa frézy a obráběná plocha jsou navzájem rovnoběžné [2].

V závislosti na kinematice obrábění se válcové frézování rozlišuje na (obr. 1.4):

- **nesousledné,**
- **sousledné.**



Obr. 1.4 Válcové frézování [6]: a) nesousledné, b) sousledné.

Při nesousledném obrábění se nástroj otáčí proti směru posuvu obrobku. Zpočátku je tloušťka třísky nulová a na konci záběru má největší tloušťku. Obrobená plocha je vytvářena, když nástroj vniká do obrobku. Obrobek musí být pevně upnut, neboť působící síly jej zvedají směrem nahoru [4].

Při sousledném frézování se nástroj otáčí ve směru posuvu obrobku. Zpočátku je tloušťka třísky největší a na konci záběru má nulovou hodnotu. Obrobená plocha je vytvářena, když nástroj opouští obrobek. Obrobek nevyžaduje tak kvalitní upnutí, jak tomu bylo u nesousledného frézování, neboť působící síly přitlačují obrobek směrem ke stolu [4].

1.3 Základní pojmy

Řezná rychlost – v_c [m/min]

Řezná rychlost označuje obvodovou rychlost, jakou opracovává břit obrobek. Jedná se o důležitou veličinu, vztahující se k nástroji, která je součástí řezných podmínek a která zajišťuje, že obrábění daným nástrojem bude probíhat co nejúčinněji [4].

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (1.1)$$

Kde:

D [mm] – průměr frézy,

n [min^{-1}] – otáčky.

Otáčky vřetene – n [min^{-1}]

Jedná se o počet otáček za minutu, které koná fréza upnutá na vřetení. Tato hodnota je vztažena ke stroji a jen málo vypovídá o tom, co se děje po obvodu frézy, tedy v místě odebrání třísky [4].

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} \quad (1.2)$$

Kde:

v_c [m/min] – řezná rychlost,

D [mm] – průměr frézy.

Posuv na zub – f_z [mm]

Posuv na zub je důležitou veličinou. Protože fréza je vícebřítý nástroj, musí existovat hodnota, která zajistí, aby každý břit obráběl za nejlepších možných podmínek. Výkon každého jednotlivého zubu určuje mez výkonnosti nástroje. Posuv na zub odpovídá dráze, kterou urazí fréza v průběhu záběru jednoho zubu [4].

$$f_z = \frac{v_f}{n \cdot z} \quad (1.3)$$

Kde:

v_f [mm/min]	–	posuvová rychlost,
n [min^{-1}]	–	otáčky,
z [-]	–	počet zubů.

Hloubka řezu – a_p [mm]

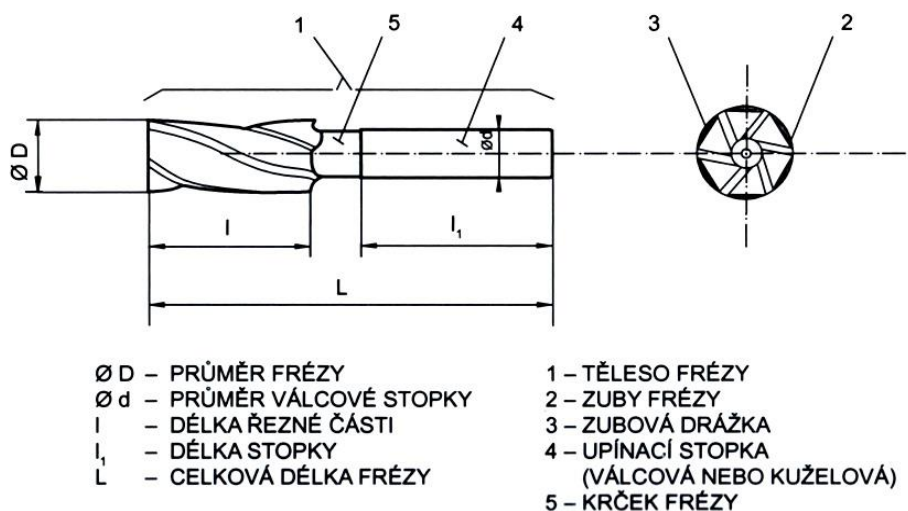
Jedná se o hodnotu axiálního nastavení frézy při rovinném frézování čelní frézou nebo při frézování do rohu. U frézování kotoučovými frézami se jedná o radiální hloubce řezu. Tato veličina významně ovlivňuje množství odebraného materiálu – výkon obrábění [4].

Šířka řezu – a_e [mm]

Při rovinném frézování čelní frézou určuje, jakou část průměru obrábí nástroj plochu obrobku. Při rovinném frézování válcovou frézou pak určuje hloubku, do jaké proniká obvod nástroje pod povrch obrobku [4].

1.4 Nástroj pro frézování

Nástroj pro frézování se nazývá fréza. Jedná se o vícebřítý nástroj, který má zuby (břity) umístěny po obvodu válcové, kuželové nebo jiné tvarové plochy. Čelní frézy mají zuby i na čele. Základní popis nástroje je na obr. 1.6 [2].



Obr. 1.6 Popis stopkové válcové frézy [5].

Frézování má stále širší uplatnění nejen ve strojírenské výrobě, proto existuje velké množství typů fréz. K rozšíření počtu druhů frézovacích nástrojů napomáhá i technologický vývoj. Na základě různých kritérií se frézy mohou dělit [2, 6]:

- podle umístění zubů:
 - válcové,
 - válcové-čelní,
 - tvarové.
- podle způsobu upínání:
 - nástrčné,
 - stopkové.
- podle tvaru břitů:
 - se zuby frézovanými.
- podle směru zubů:
 - se zuby přímými,
 - se zuby šikmými,
 - se zuby na šroubovici.
- podle materiálu:
 - frézy z nástrojové oceli,
 - frézy s břitovými destičkami ze slinutých karbidů,
 - frézy s břitovými destičkami z keramických řezných materiálů.
- podle smyslu otáčení:
 - přímořezné,
 - levořezné.
- podle počtu zubů vzhledem k průměru frézy:
 - jemnozubé (počet zubů $z = \sqrt{1,25D}$),
 - polohrubozubé,
 - hrubozubé.
- podle konstrukce:
 - celistvé,
 - se vkládanými řeznými destičkami.
- podle geometrického tvaru:
 - válcové,
 - kotoučové,
 - úhlové,
 - tvarové,
 - atd. [2, 6].

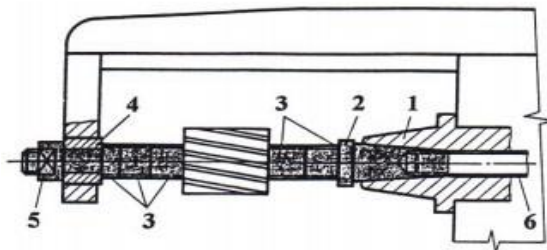
1.5 Upínání nástrojů

Rozhodujícími parametry pro volbu vhodného upínače pro upnutí frézy jsou tvar a velikost nástroje a způsob frézování. Upnutí musí být vždy pevné a spolehlivé.

Frézy nástrčné

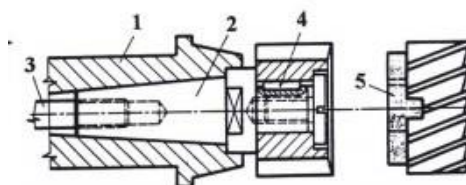
Nástrčné frézy se na frézkách upínají pomocí frézovacích trnů. Tvar kužele frézovacího trnu odpovídá tvaru dutiny vřetena nástroje, do kterého se trn umísťuje. Kužely jsou buď **metrické**, **Morse** anebo **strmé** [7].

Metrický a Morse kužel jsou samosvorné a přenášejí krouticí moment z vřetena na trn. Nákrůžek na konci frézovacího trnu zapadá do obdélníkového vybrání na konci vřetena a zdokonaluje tak přenos tohoto momentu. Na dlouhé frézovací trny (obr. 1.7) se upínají frézy čelní, válcové a kotoučové. Krátké trny (obr. 1.8) jsou určeny zejména pro frézy čelní a frézovací hlavy [7].



1 - vřeteno, 2 - trn, 3 - rozpěrné kroužky,
4 - podpěrné ložisko, 5 - upínací matice,
6 - upínací šroub

Obr. 1.7 Dlouhý frézovací trn [6].



1 - vřeteno, 2 - trn, 3 - upínací šroub
4 - podélné pero, 5 - příčné pero

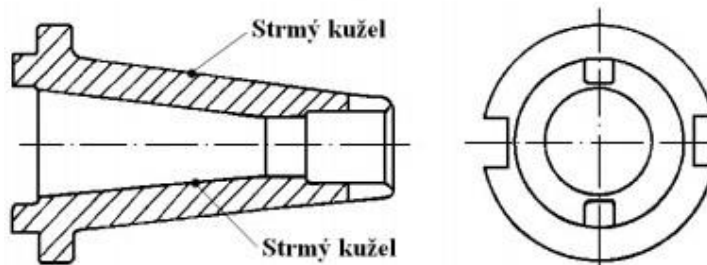
Obr. 1.8 Krátký frézovací trn [6].

Frézy s válcovou stopkou

Dříve se pro upnutí fréz s válcovou hlavou používala **sklíčidla s upínacím pouzdem**. V dnešní době jsou sklíčidla nahrazována **tepelnými** nebo **hydraulickými** upínači. U tepelných upínačů se využívá rychlého zvýšení teploty a následného ochlazení, přičemž dochází ke smrštění materiálu upínače, ve kterém je umístěn nástroj. Pro uvolnění frézy se upínač znova ohřeje. Hydraulický upínač funguje na principu zvyšování tlaku oleje v dutině upínače [6].

Frézy s kuželovou stopkou

Frézy s kuželovou stopkou se upínají pomocí **redukčních pouzder** (obr 1.9) ve vřetenu stroje. Dutina vřetena má stejný kuželovitý tvar jako vnější kužel redukčního pouzdra. Tvar jeho vnitřního kužele je shodný s kuzelem upínací stopky frézy [6].



Obr. 1.9 Redukční pouzdro [7].

1.6 Frézovací stroje

Stroje pro frézování – frézky se dle konstrukce dělí do 4 základních skupin:

- konzolové,
- stolové,
- rovinné,
- speciální.

Podle parametru řízení se rozlišují frézky ovládané ručně a řízené programem. Důležitými parametry stroje jsou šířka upínací plochy stolu, velikost kužele ve vřetenu pro upnutí nástroje, maximální délka pohybu pracovního stolu a vřeteníku, rozsah otáček vřetena a posuvů a výkon elektromotoru pro otáčení vřetena [2].

Konzolové frézky

Konzolové frézky (obr. 1.10) jsou pojmenovány podle nastavitelné konzoly, která se pohybuje ve vertikálním směru po vedení stojanu. Kombinace příčného a podélného stolu na konzole společně s pohybem konzoly umožňuje přiřadit upnutému obrobku tři pravouhlé souřadnice vzhledem k nástroji. Stroje tohoto typu nacházejí uplatnění v kusové nebo malosériové výrobě a jsou vhodné zejména pro frézování rovinných a tvarových ploch. Jsou vyráběny ve třech provedeních, a to vodorovné (horizontální), svislé (vertikální) a univerzální [6].

Stolové frézky

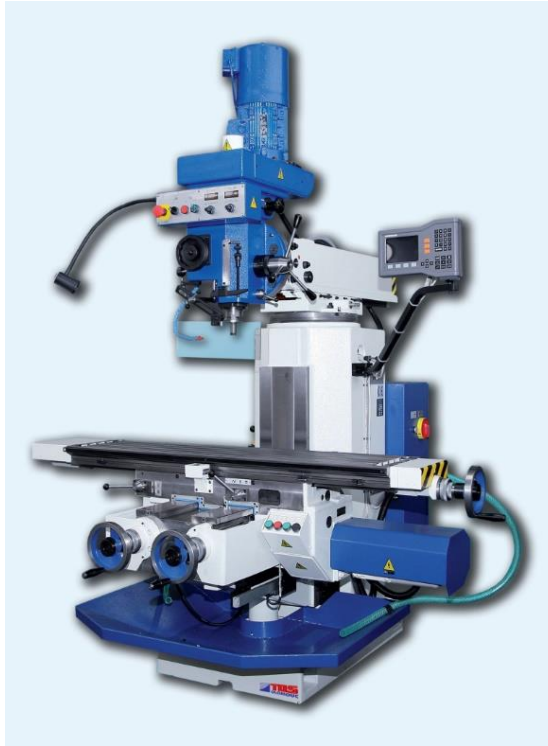
Stolové frézky mají obvykle podélný a příčný stůl. Vertikální pohyb pro nastavení nástroje vzhledem k obrobku je způsoben posunováním frézovacího vřeteníku po vedení stroje. Tento druh frézky je vhodný pro obrobky větších rozměrů a hmotností a je vyráběn ve dvojitých provedeních – svislé a vodorovné [6].

Rovinné frézky

Rovinné frézky patří mezi nejvýkonnější frézovací stroje. Jejich robustní konstrukce jim umožňuje obrábět velké a těžké součásti. Pracovní stůl má pouze jeden stupeň volnosti, a to ve vodorovném směru. U tohoto typu stroje je možné mít více vřeteníků – vodorovných i svislých. Frézky nejsou vhodné jen pro kusovou a malosériovou výrobu, ale také pro větší série. Nejčastěji se pro frézování používají frézovací hlavy (plochy) nebo stopkové frézy (úzké plochy a drážky) [6].

Speciální frézky

Do této kategorie patří frézky pro specifické frézovací operace. Patří sem např. frézky na ozubení, na závity, na vačky, na drážky, frézky bubnové, karuselové atd. [8].



Obr. 1.10 Konzolová frézka [9].

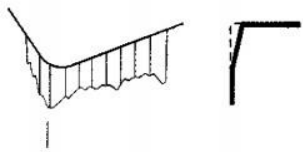
2 FORMY OPOTŘEBENÍ ŘEZNÉHO FRÉZOVACÍHO NÁSTROJE

Opotřebení vzniká při vzájemném kontaktu strojních součástí a nelze mu nijak zabránit. Hraje důležitou roli v produktivitě a hospodárnosti obrábění. Opotřebení břitu nástroje závisí na mnoha faktorech, kterými jsou např. fyzikální a mechanické vlastnosti materiálu obrobku a nástroje, druh obráběcí operace, geometrie nástroje, pracovní a řezné podmínky aj. Během obrábění působí mnoho fyzikálně chemických jevů, kterým se říká mechanismy opotřebení. Mezi základní mechanismy opotřebení patří [6]:

- **abraze** – brusný ořev vlivem tvrdých mikročástic materiálu obrobku a nástroje,
- **adheze** – vznik a okamžité porušení mikrosvarových spojů na styku nerovností čela a třísky, důsledek vysokých teplot a tlaků, chemické příbuznosti materiálů a kovově čistých styčných povrchů,
- **difúze** – vznik nežádoucích chemických sloučenin ve struktuře nástroje,
- **oxidace** – vznik chemických sloučenin na povrchu nástroje v důsledku přítomnosti kyslíku,
- **plastická deformace** – důsledek vysokého tepelného a mechanického zatížení,
- **křehký lom** – důsledek vysokého mechanického zatížení, nehomogenity, vměstku.

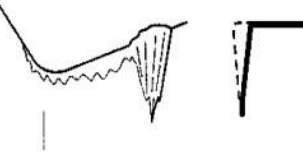
Nadměrné opotřebení hřbetu břitu – tab. 2.1

Tab. 2.1 Nadměrné opotřebení břitu [10, 19].

Problém	Příčina	Náprava	
špatná kvalita povrchu	příliš vysoká řezná rychlost	snížení řezné rychlosti	
nepřesnost rozměrů	nedostatečná odolnost proti opotřebení	volba materiálu s vyšší odolností proti opotřebení	
narůstající tření	malý posuv	zvýšení posuvu	


Opotřebení ve tvaru vrubu na břitu – tab. 2.2

Tab. 2.2 Opotřebení ve tvaru vrubu na břitu [10, 19].

Problém	Příčina	Náprava	
špatná kvalita povrchu	mechanicky zpevňující materiály	snížení řezné rychlosti, volba houževnatějšího materiálu	
riziko vylomení břitu	okuje na obrobku	zvýšení řezné rychlosti	

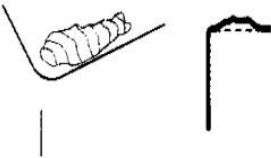
Vylamování bříty – tab. 2.3

Tab. 2.3 Vylamování bříty [10, 19].

Problém	Příčina	Náprava	
špatná kvalita povrchu	příliš křehký materiál	volba houževnatějšího materiálu	
nadměrné opotřebení bříty	slabá geometrie VBD	VBD se silnější geometrií	
	vytváření nárůstku na břitech	zvýšení řezné rychlosti, snížení posuvu na začátku řezu	

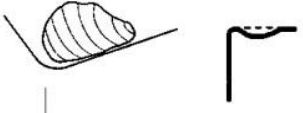
Tvorba nárůstku – tab. 2.4

Tab. 2.4 Tvorba nárůstku [10, 19].

Problém	Příčina	Náprava	
špatná kvalita povrchu	nízká řezná rychlost	zvýšení řezné rychlosti	
vylamování bříty při odtržení nárůstku	negativní řezná geometrie	volba pozitivní geometrie	

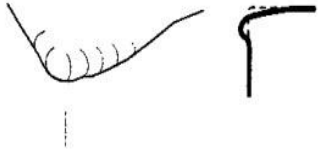
Kráterové opotřebení ve tvaru žlábků – tab. 2.5

Tab. 2.5 Kráterové opotřebení ve tvaru žlábků [10, 19].

Problém	Příčina	Náprava	
zeslabení bříty, popř. jeho vylomení (špatná kvalita povrchu)	difuzní opotřebení vzniklé příliš vysokými teplotami na straně čela	snížení řezné rychlosti pro snížení teploty	
		snížení posuvu	


Plastická deformace břitu – tab. 2.6

Tab. 2.6 Plastická deformace břitu [10, 19].

Problém	Příčina	Náprava	
<p>špatná kvalita povrchu</p> <p>změna geometrie břitu</p> <p>změna odchodu třísek</p>	příliš vysoká teplota a vysoký tlak	<p>volba materiálu s lepší odolností proti plastické deformaci</p> <p>snížení řezné rychlosti</p>	

Tepelné trhliny – tab. 2.7

Tab. 2.7 Tepelné trhliny [10, 19].

Problém	Příčina	Náprava	
<p>špatná kvalita povrchu</p> <p>trhliny způsobují vylamování břitu</p>	<p>kolísání teploty vzniklé přerušovanými řezy</p> <p>kolísání teploty vzniklé přerušovaným chlazením</p>	<p>volba houževnatějšího materiálu odolnému proti tepelným rázům</p> <p>přivádět dostatečné množství chladicí kapaliny nebo ji nepoužívat vůbec</p>	

3 POVLAKY

Povlakování hraje podstatnou roli při zlepšování užitých vlastností obráběcích nástrojů, které tak dosahují lepší efektivity a produktivity. Povrch opatřený tenkou vrstvou povlaku má vyšší tvrdost, otěruvzdornost, lepší odolnost vůči opotřebení, tepelným vlivům, korozi a oxidaci. Moderní technologie povlakování vytváří odolné vrstvy přímo na povrchu nástroje a zachovávají tak jeho geometrii. Dvě základní technologie povlakování jsou [11, 12]:

- CVD – Chemical Vapour Deposition – chemická depozice par,
- PVD – Physical Vapour Deposition – fyzikální depozice par.

Další používanou technologií je:

- PACVD – Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition – chemická depozice pomocí plazmatu [11, 12].

Povlaky CVD

Povlak CVD vzniká chemickou reakcí a má obvykle tloušťku vrstvy od 5 do 20 μm . Nástroje jsou umístěny v uzavřeném reaktoru, kde při teplotě okolo 1000 °C dochází k vyloučení tvrdých materiálů z plynné fáze. Výhodou této metody je vysoká přilnavost povlaku na materiál nástroje. Mezi povlaky tohoto typu patří karbid titanu TiC, nitrid titanu TiN, oxid hlinitý Al₂O₃ a jiné [17].

Povlaky PVD

PVD povlaky vznikají ve vakuové komoře při teplotách zpravidla mezi 150 a 500 °C. Materiál povlaku (chrom, titan, hliník) je z tzv. terče buď odpařen při vysoké teplotě, nebo je terč bombardován ionty. Kovové páry vytvoří s reaktivním plynem směs, která se na nástroj nanáší ve formě tenkého přilnavého povlaku. U této metody lze vlastnosti povlaku (tvrdost, chemická a tepelná odolnost atd.) přizpůsobit funkci nástroje [13].

PVD povlaky jsou hlavní specializací společnosti SHM, s.r.o., která vytváří vlastní povlaky pro různé průmyslové aplikace. Příklady těchto povlaků jsou:

- TripleCoating Si,
- TripleCoating Cr.

TripleCoating Si

Povlak tvořený TiN + AlTiN + vrstvou s vysokým obsahem křemíku. Vyšší obsah křemíku umožňuje použití povlaku za intenzivních řezných podmínek nebo obrábění vysoce kalených ocelí [14].

Aplikace: Obrábění zušlechťených ocelí s tvrdostí nad 60 HRC, obrábění za intenzivních řezných podmínek [14].

TripleCoating Cr

Povlak tvořený adhezní vrstvou TiN, středovou vrstvou AlTiN a vrchní nanokompozitní vrstvou CrAlSi, který kombinuje vynikající houževnatost a tvrdost vrstvy AlTiN a extrémně vysokou tvrdost nanokompozitní vrstvy CrAlSiN [15].

Aplikace: Obrábění kalených materiálů, korozivzdorných materiálů a velmi náročné aplikace [15].

4 VYSOCE KALENÁ OCEL

Kalení je způsob tepelného zpracování tzv. feritických ocelí, kdy se ocel ohřeje na kalicí teplotu a poté se rychle ochladí. Po kalení má ocel vysokou tvrdost, ztrácí však svou houževnatost a stává se křehčí [16].

Do skupiny tzv. tvrzených materiálů patří kalené a popuštěné oceli s tvrdostí v rozmezí 45 až 68 HRC. Nejvíce používané jsou cementované oceli s tvrdostí okolo 60 HRC, oceli pro výrobu kuličkových ložisek dosahujících tvrdosti 60 HRC a nástrojové oceli, které mají tvrdost až 68 HRC. Za vysoce kalené oceli se považují tři výše zmíněné skupiny kalených ocelí (cementované, pro kuličková ložiska, nástrojové) [16].

Mezi nejběžnější součásti vyrobené z takto tvrdých ocelí patří vložené hřídele, skříně převodovek, pastorky řízení nebo lisovadla [16].

5 PROFIL SPOLEČNOSTI ING. ZDENĚK KRÁTKÝ

Společnost Ing. Zdeněk Krátký byla založena roku 2000 a má sídlo ve Zlíně. Zabývá se zejména výrobou frézovacích nástrojů ze slinutých karbidů. Původním záměrem firmy bylo vyrábět nástroje standartní. Na základě požadavků zákazníků na nástroje speciální se výrobní program změnil a dnes je poměr standartních a speciálních nástrojů téměř 1:1. Vedle samotné výroby nástrojů společnost nabízí také sériové nebo zakázkové frézování kovů i jiných materiálů. Na trhu se společnost prezentuje označením K-TOOLS (obr 5.1).

Důležitými parametry nástrojů pro vysokorychlostní obrábění jsou jejich výkon a trvanlivost. Z ohledem na tuto skutečnost se pro výrobu používají materiály z jemnozrnného karbidu wolframu. Nástroje jsou dále broušeny osvědčenými technologickými postupy na přesných CNC strojích, které se vyvíjejí společně s technologiemi a s požadavky zákazníků. Během výrobního procesu a na jeho konci je kontrolována kvalita výrobků moderními CNC měřicími přístroji. Pro zlepšení mechanických vlastností bývají nástroje opatřeny výkonným povlakem.

Pro frézování jsou používána moderní 5osá frézovací centra vhodná pro středně, malo-sériovou nebo kusovou výrobu složitých a přesných dílců. Přesnost a kvalita obráběných dílců je během výrobního procesu i po jeho skončení kontrolována pomocí moderních CNC měřicích strojů. Díky dlouhodobým vztahům s externími dodavateli je společnost schopna zajistit všechny druhy běžných povrchových úprav a tepelného zpracování.



Obr. 5.1 Logo společnosti Ing. Zdeněk Krátký [21].

6 TESTOVÁNÍ FRÉZOVACÍHO NÁSTROJE

6.1 Popis testu

V praktické části práce byl dle požadavků a možností společnosti Ing. Zdeněk Krátký proveden test vybraného frézovacího nástroje. Konkrétně se jednalo o stopkovou válcovou frézu určenou pro frézování vysoce kalených ocelí, která byla opatřena dvěma různými typy povlaků. Cílem testu bylo nalézt vhodnou řeznou rychlost nástroje s daným povlakem a porovnat oba povlaky vůči sobě.

6.2 Vyhodnocení

Pro vyhodnocení je třeba vysvětlit určité pojmy, které souvisí s opotřebením řezného nástroje – konkrétně pojmy *trvanlivost* a *životnost*.

Trvanlivost řezného nástroje lze definovat jako součet všech čistých časů řezání, od začátku obrábění, až po opotřebení břitu nástroje na předem stanovenou hodnotu vybraného kritéria (kritérium opotřebení a jeho hodnota musí být stanoveny tak, aby vyráběný obrobek měl požadovaný tvar, rozměry a kvalitu povrchu a to po celou dobu trvanlivosti nástroje) [6].

Životnost nástroje je definována jako součet všech jeho trvanlivostí, nebo též jako celková doba funkce nástroje od prvního uvedení do činnosti až do jeho vyřazení (nástroje, které lze ostřit jsou vyřazeny v případě, že byla odbroušena celá jejich funkční část) [6].

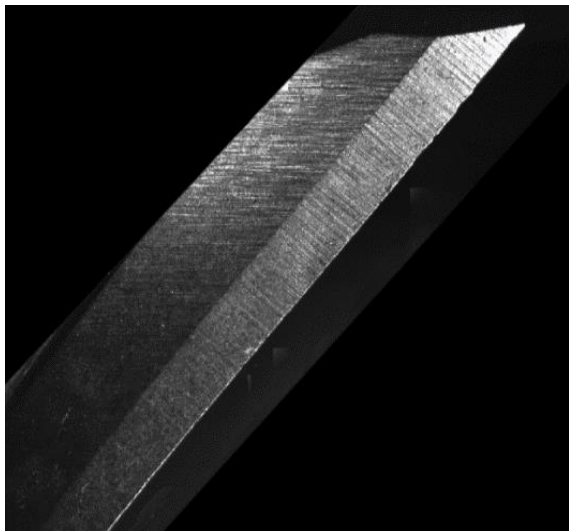
Jako kritérium pro vyhodnocení byla zvolena šířka otupení na hřbetu nástroje VB, jejíž hodnota byla stanovena na 0,1 mm. Po překročení této hodnoty byl nástroj vyhodnocen jako nezpůsobilý pro další obrábění. Celkový čas obrábění nástroje v testu je roven jeho životnosti. Mimo otupení byly také měřeny parametry opotřebení délky nástroje a změna průměru nástroje.

Daný nástroj s daným povlakem byl testován při obrábění třemi různými řeznými rychlostmi. Časy frézování do dosažení stanovené hranice otupení se lišily podle řezné rychlosti, kterou nástroj obráběl, a povlaku na nástroji. Při vyhodnocování byly porovnávány parametry množství odebraného materiálu do otupení 0,1 mm na hřbetu nástroje při dané řezné rychlosti a výkon nástroje – rychlost odebrání materiálu při obrábění danou řeznou rychlostí. Rozhodujícím parametrem pro volbu nejvhodnější řezné rychlosti a lepšího ze dvou povlaků byly celkové náklady na obrobek určitého množství materiálu. Celkové náklady zahrnují sazbu stroje, cenu nástrojů a další potřebné proměnné.

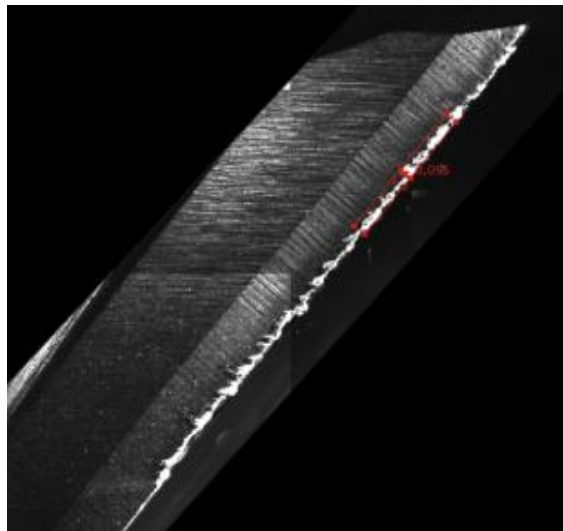
6.3 Průběh testu

Každý nástroj odfrézoval za určitých řezných podmínek stejné množství materiálu ve vrstvách. Po obrobení jedné vrstvy byl nástroj proměřen na univerzálním měřicím stroji ZOLLER – genius 3s - pilot 3.0., kde byly zjištěny hodnoty šířky otupení na hřbetu nástroje, změny délky a změny průměru nástroje. Pro vizuální porovnání byly na tomtéž přístroji pořízeny fotografie otupení na hřbetu frézy. Pokud byla hodnota otupení vyšší než 0,1 mm, v testu se s daným nástrojem dále nepokračovalo. Pokud byla hodnota opotřebení nižší než 0,1 mm, byla odebrána další vrstva a nástroj byl poté znovu proměřen. Takto se pokračovalo, dokud nebylo dosaženo stanoveného otupení. Pokud nebyla hraniční hodnota překročena ani po odebrání 4 vrstev materiálu, šířka otupení byla na hodnotu 0,1 mm dopočítána z nejbližší dosaženého otupení.

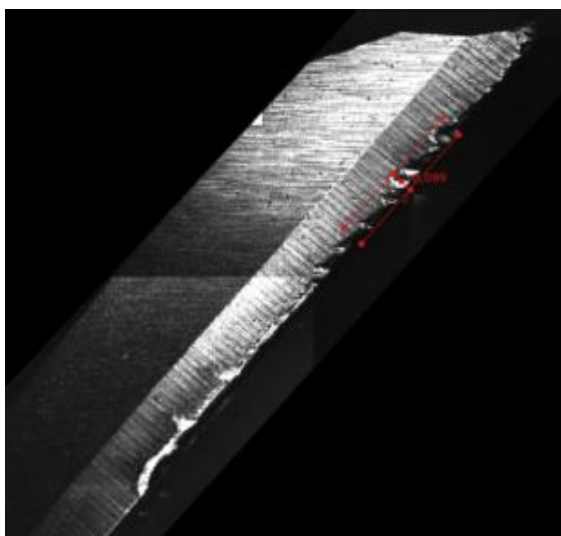
Po každé odfrézované vrstvě byla na stroji ZOLLER – genius 3s - pilot 3.0 pořízena fotografie břitu a změřena šířka otupení – vyznačeno červeně na obr 6.1 – 6.3. Byly změřeny hodnoty pro všechny 4 zuby a jejich průměr byl zapsán do tabulky pro další výpočty. Zde lze konkrétně pozorovat měření šířky otupení pro řeznou rychlost 69,7 m/min u nástroje s povlakem Triple Coating Cr (obr. 6.1 – obr. 6.3).



Obr. 6.1 Původní břit.



Obr. 6.2 Břit po odebrání 1. vrstvy.



Obr. 6.3 Břit po odebrání 2. vrstvy.

6.4 Volba testovaného nástroje

Zvolený testovací nástroj je stopková válcová fréza ze slinutého karbidu o následujících parametrech [18]:

Geometrie

- úhel čela pracovní části $\gamma = 8^\circ$,
- úhel šroubovice $\omega = 45^\circ$,
- počet zubů $z = 4$,
- stopka nástroje dle DIN 6335 HA (hladká stopka).

Mikrogeometrie a dokončovací operace

- **zaoblení (rounding)** řezné hrany nástroje – optimalizovaná velikost zaoblení pro zvýšení životnosti nástroje,
- **leštění (polishing)** nástroje před nebo po povlaku – zlepšení odvodu třísky z místa řezu a zvýšení životnosti nástroje.

Povlak

Pro test byly použity nástroje opatřeny dvěma různými povlaky, které byly blíže specifikovány v teoretické části práce.

- **TripleCoating Cr** (obr. 6.4),
- **TripleCoating Si** (obr. 6.5).



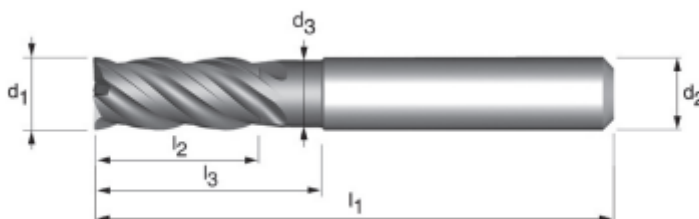
Obr. 6.4 Povlak TripleCoating Cr [15].



Obr. 6.5 Povlak TripleCoating Si [14].

Rozměry nástroje (obr 6.6):

- $d_1 = 6 \text{ mm}$,
- $d_2 = 6 \text{ mm}$,
- $d_3 = 5,7 \text{ mm}$,
- $l_1 = 57 \text{ mm}$,
- $l_2 = 13 \text{ mm}$,
- $l_3 = 20 \text{ mm}$.



Obr. 6.6 Model testovaného nástroje [18].

Použití

- **doporučené** – oceli s pevností < 2100 MPa a tvrdostí < 70 HRC,
- **použitelné** – oceli s pevností < 1200 MPa a tvrdostí < 40 HRC, korozivzdorné oceli, tvárné a šedé litiny, hliník a jeho slitiny.

6.5 Podmínky pro obrábění

Řezné podmínky byly zadány společností Ing. Zdeněk Krátký na základě předchozích testování. Tabulka obsahující všechny hodnoty je označena jako Příloha 1 – Řezné podmínky pro testování a je umístěna na konci práce. Základní parametry jsou zapsány v tab. 6.1. Testování proběhlo pro 3 různé řezné rychlosti. Ostatní parametry jako posuv na zub, hloubka řezu a šířka řezu zůstaly nezměněny.

Tab. 6.1 Základní řezné podmínky pro testování.

v_c [m/min]	n [min ⁻¹]	f_z [mm]	a_p [mm]	a_e [mm]
56,5	3 000	0,060	2,000	0,160
69,7	3 700			
84,8	4 500			

Obráběcí stroj: Rödgers RXP500 DS – 5osé obráběcí centrum,
 Obráběný materiál: kalená ocel o tvrdosti 63 HRC,
 Plocha obráběné vrstvy S: 170 × 101 mm²,
 Chlazení: olejová mlha,
 Způsob frézování: sousledné.

6.6 Hledání vhodné řezné rychlosti

Pro testování bylo vyčleněno celkem sedm nástrojů. Tři nástroje byly napovlakovány povlakem TripleCoating Cr (dále Triple Cr), zbylé čtyři povlakem TripleCoating Si (dále Triple Si). Pro povlak Triple Si byly původně vybrány také tři nástroje, avšak během testování se ukázalo, že nástroje s tímto povlakem dosahují lepších výsledků, a tak byl do testu přidán jeden nástroj navíc se sníženou řeznou rychlostí na 45,5 m/min. Přehled použitých řezných rychlostí a časů frézování je v tab. 6.2.

Tab. 6.2 Přehled použitých řezných rychlostí a časů frézování.

Povlak	v_c [m/min]	Doba frézování 1 vrstvy T_{vrstvy} [hod]	Úběr materiálu Q [cm ³ /hod]
Triple Cr	56,5	1,23	13,93
	69,7	1,00	17,13
	84,8	0,82	20,90
Triple Si	45,5	1,53	11,20
	56,5	1,23	13,93
	69,7	1,00	17,13
	84,8	0,82	20,90

Po testování všech nástrojů bylo dosaženo výsledků zobrazených v tab. 6.3 a tab. 6.4.

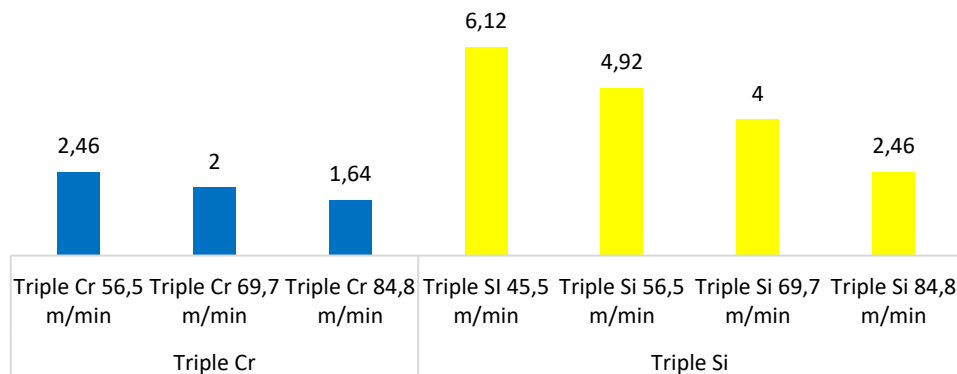
Tab. 6.3 Naměřené hodnoty pro jednotlivé řezné rychlosti a povlaky.

Povlak	v_c [m/min]	Počet odebraných vrstev (n_{vrstev})	Celkové otupení VB [mm]	Zkrácení délky [mm]	Zmenšení průměru [mm]
Triple Cr	56,5	2	0,101	0,020	0,017
	69,7	2	0,111	0,009	0,025
	84,8	2	0,100	0,023	0,019
Triple Si	45,5	4	0,092	0,025	0,033
	56,5	4	0,083	0,033	0,023
	69,7	4	0,088	0,021	0,024
	84,8	3	0,122	0,024	0,019

Nástroje opatřené povlakem Triple Cr dosáhly hraničního otupení již po odfrézování 2 vrstev. Nástroje s povlakem Triple Si zvládly ve třech případech obrobit až 4 vrstvy a otupení na hřbetu bylo menší než 0,1 mm. V jednom případě, při řezné rychlosti 84,8 m/min, byl nástroj otupen mezi druhou a třetí vrstvou. Vývoj otupení pro jednotlivé nástroje je možné sledovat na obr. 6.8.

Nástroje, které odebraly více vrstev a pracovaly tedy déle, mají vyšší nebo stejné hodnoty celkového zkrácení délky a zmenšení průměru pracovní části než ty, které odebraly vrstev méně. Vývoj těchto opotřebení lze pozorovat na obr. 6.9 a obr. 6.10.

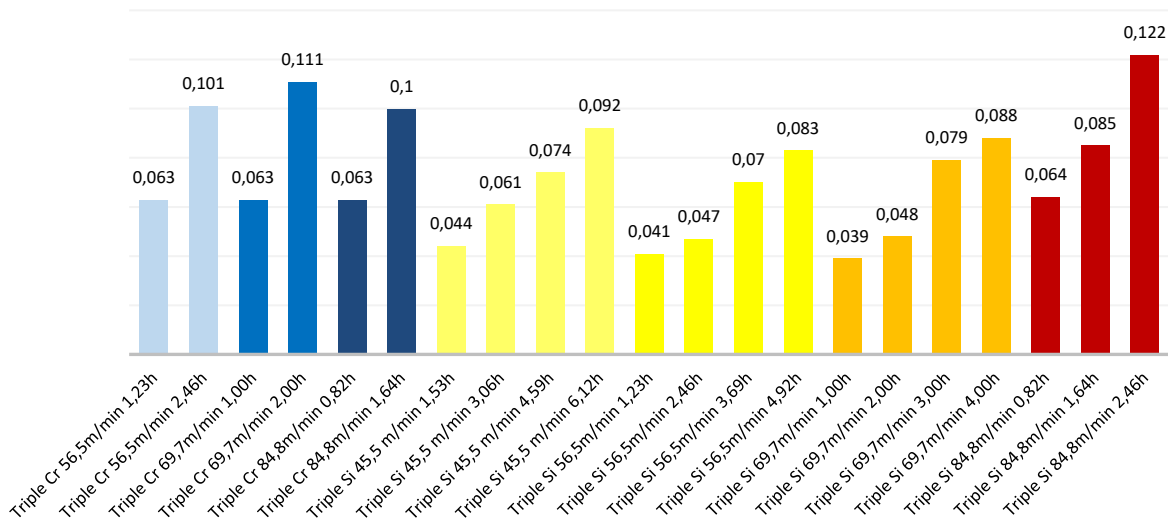
Obr. 6.7 ukazuje, jak dlouho pracovaly jednotlivé nástroje během testování.



Obr. 6.7 Celková doba obrábění nástroje [hod].

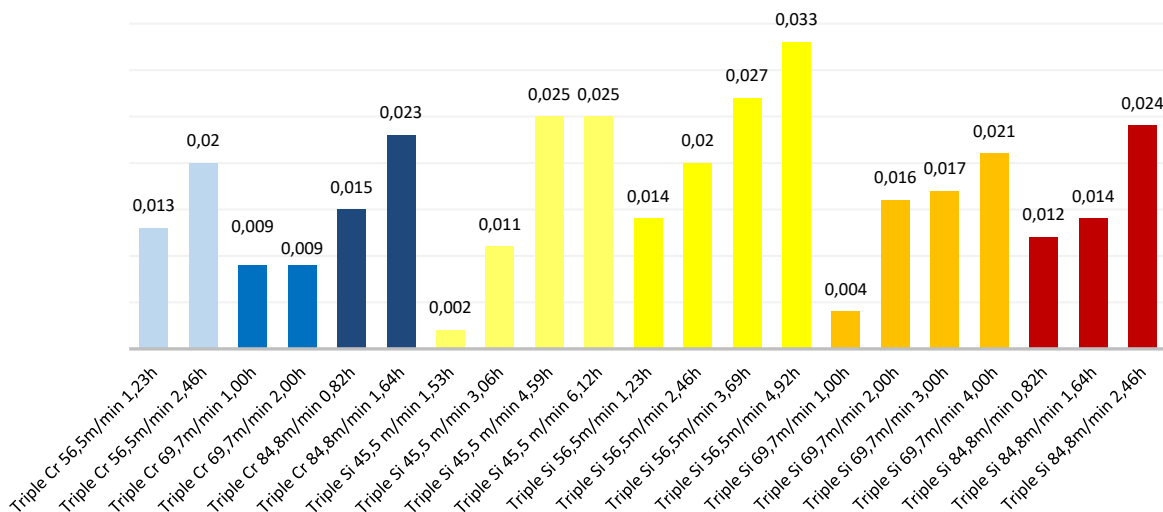
Grafické závislosti znázorněny modrou barvou jsou pro povlak Triple Cr. Každý odstín zastupuje nástroj s jednou řeznou rychlostí. Stejně tomu je pro povlak Triple Si, který je znázorněn odstíny žluté a červené barvy. Popisek každého sloupce obsahuje název použitého povlaku, řeznou rychlost a celkovou dobu obrábění daným nástrojem.

Na obr. 6.8 lze vidět, že nástroje s povlakem Triple Si dosahovaly při použití středních řezných rychlostí (56,5 m/min a 69,7 m/min) méně než polovičního otupení po odebrání 2 vrstev materiálu, než nástroje s povlakem Triple Cr.



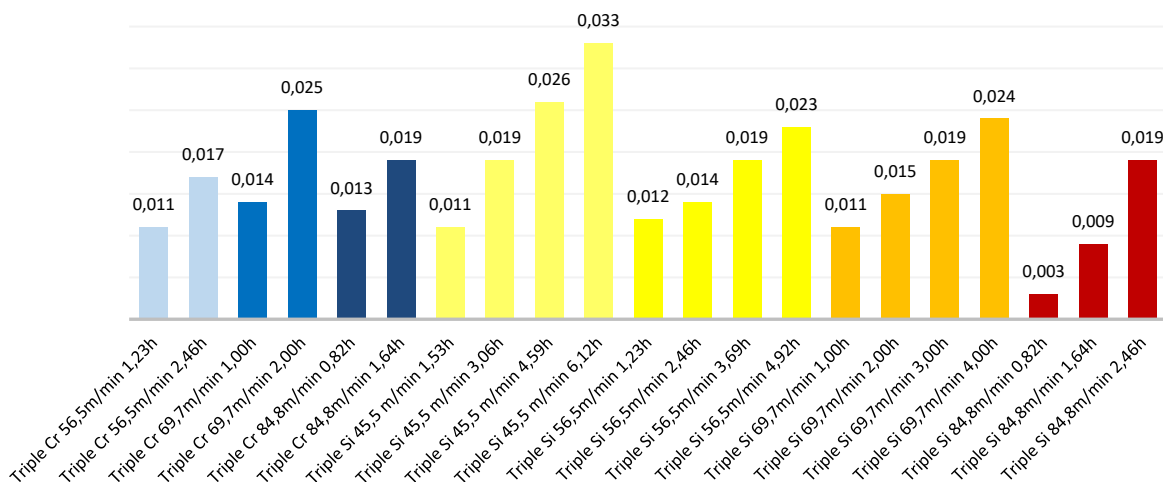
Obr. 6.8 Vývoj otupení na hřbetu [mm].

U vyhodnocování zkrácení délky nástroje (obr. 6.9) nelze jednoznačně určit, který povlak se jeví jako lepší. Nástroje, které pracovaly delší dobu, byly více zkráceny.



Obr. 6.9 Zkrácení délky nástroje [mm].

Zmenšení průměru pracovní části nástroje (obr. 6.10) souvisí s otupením na hřbetu. Nástroje s povlakem Triple Si dosahovaly nižších hodnot tohoto opotřebení než ty, které byly opatřeny povlakem Triple Cr. Stejně tomu je také u zmenšení průměru pracovní části nástroje.



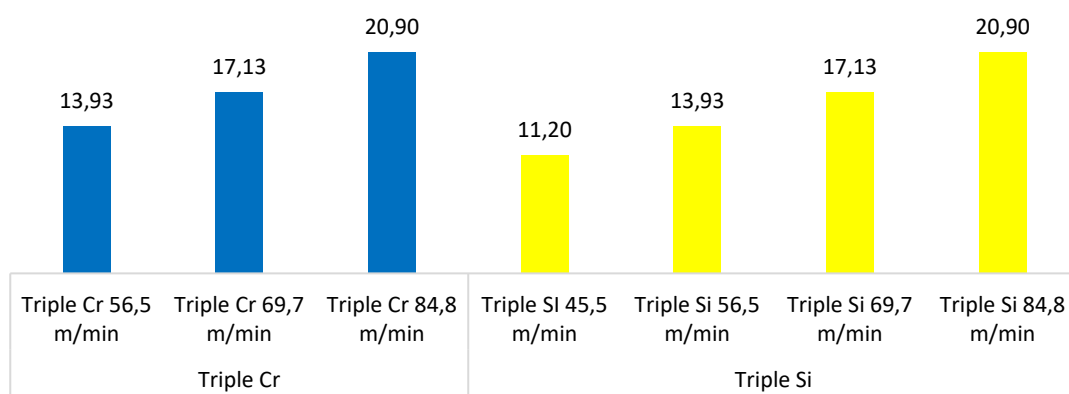
Obr. 6.10 Zmenšení průměru pracovní části nástroje [mm].

V tab. 6.4 je důležitým parametrem množství odfrézovaného materiálu daným nástrojem, než bylo dosaženo šířky otupení na břit nástroje 0,1 mm a nástroj byl vyhodnocen jako nezpůsobilý pro další obrábění. Lze zde také pozorovat dobu, za kterou by fréza pracující danou řeznou rychlostí tohoto otupení dosáhla.

Tab. 6.4 Naměřená a přepočítaná data.

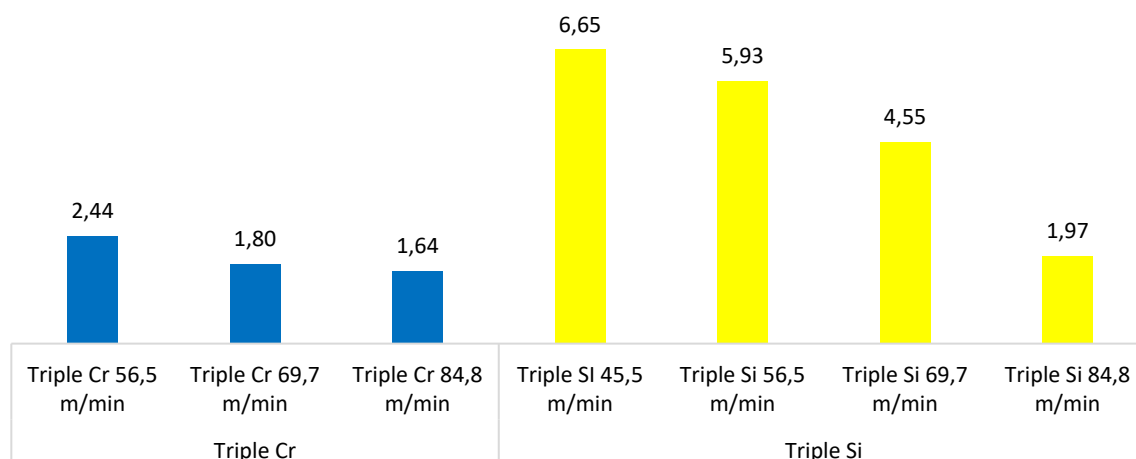
Povlak	Řezná rychlost v_c [m/min]	Životnost nástroje Z [hod]	Celkový objem odebraného materiálu $V_{\text{celk.}}$ [cm ³]	Celkový odebraný objem do otupení 0,1 mm $V_{0,1 \text{ mm}}$ [cm ³]
Triple Cr	56,5	2,44	34,27	33,93
	69,7	1,80	34,27	30,87
	84,8	1,64	34,27	34,27
Triple Si	45,5	6,65	68,54	74,50
	56,5	5,93	68,54	82,57
	69,7	4,55	68,54	77,88
	84,8	1,97	51,40	41,22

Obr 6.11 ukazuje, jakou rychlostí jednotlivé nástroje odebíraly materiál v jednotkách [cm³/hod].



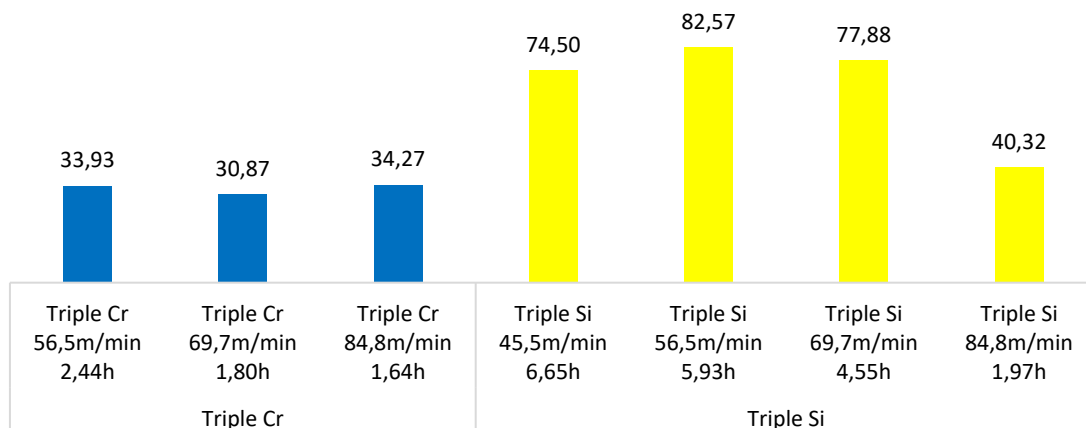
Obr 6.11 Úběr materiálu Q [cm³/hod].

Jednotlivé obráběcí časy vztažené k hraniční hodnotě otupení na hřbetu nástroje lze porovnat na obr. 6.12. Při vyšších řezných rychlostech byl nástroj otupen mnohem dříve. Pro stejné hodnoty řezných rychlostí byly nástroje s povlakem Triple Cr otupeny daleko dříve než nástroje s povlakem Triple Si.



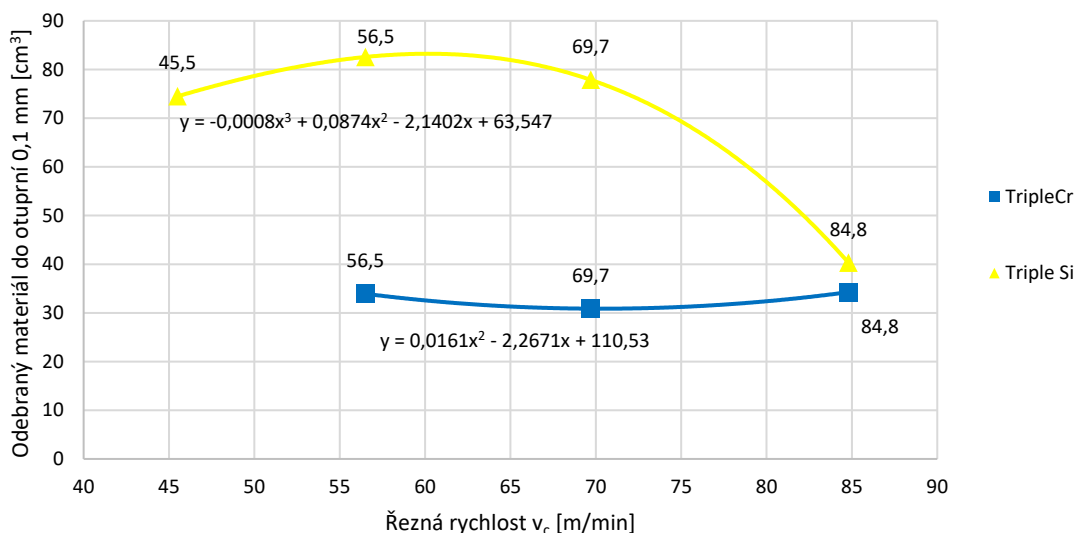
Obr. 6.12 Celková doba obrábění do otupení 0,1 mm na hřbetu [hod].

Nástroj, který vydrží obrábět nejdéle, než dosáhne otupení 0,1 mm, neodebírá největší množství materiálu. Je to způsobeno tím, že každý nástroj obrábí jinou řeznou rychlostí. Přehledně to ukazuje obr. 6.13. Popisek sloupce obsahuje údaje o povlaku a řezné rychlosti, ale také informaci o době obrábění pro dosažení hraničního otupení.



Obr. 6.13 Odebraný materiál do otupení 0,1 mm [cm³].

Obr. 6.13 lze znázornit v následující podobě – obr. 6.14. Na ose x je nanesena řezná rychlost, na ose y množství odebraného materiálu do otupení 0,1 mm. Získané body jsou proloženy polynomem n-tého stupně. Ze vzniklých křivek lze odhadnout oblast vhodných hodnot řezné rychlosti, pokud je jako rozhodující parametr pro vyhodnocení uvažována životnost nástroje.



Obr. 6.14 Nejvhodnější řezná rychlost z hlediska životnosti nástroje [m/min].

Pro povlak Triple Si by byla z provedeného měření nejvhodnější hodnota řezné rychlosti rovna 60 m/min. U povlaku Triple Cr nelze tuto hodnotu jednoznačně určit. Pro přesnější vykreslení grafické závislosti a ověření naměřených dat by bylo potřeba více měření. Společnost Ing. Zdeněk Krátký měla pro testování vyhrazena určitý počet nástrojů a určitý čas, během kterého testy probíhaly. Z důvodu plánované výroby se v testování dále nepokračovalo.

Na základě dosavadního testování se jako lepší povlak pro frézování vysoko kalených ocelí ukázal povlak Triple Si. Nástroje s tímto povlakem vydržely za stejných řezných podmínek

pracovat déle než nástroje s povlakem Triple Cr. Díky delším časům frézování obrobily podstatně větší objem materiálu, než byly vyhodnoceny jako nezpůsobilé pro další frézování.

6.7 Výpočty zkoumaných parametrů

Všechny výpočty, který jsou potřebné pro sestavení předchozích grafických závislostí jsou sepsány níže.

V tab. 6.5 je seznam počítaných parametrů, jejich označení a jednotek.

Tab. 6.5 Seznam parametrů pro sestavení grafů.

Parametr	Označení	Jednotka
Plocha obráběné vrstvy	S	mm ²
Objem jedné vrstvy (6.1)	V _{vrstvy}	cm ³
Celkový odebraný materiál (6.2)	V _{celk.}	cm ³
Počet vrstev	n _{vrstev}	-
Celková doba obrábění (6.3)	T _{celk.}	hod
Doba obrábění jedné vrstvy	T _{vrstvy}	hod
Výkon nástroje (6.4)	Q	cm ³ /hod
Celkové otupení na hřbetu frézy	VB	mm
Životnost nástroje (6.5)	Z	hod
Celkový odebraný objem do otupení 0,1 mm (6.6)	V _{0,1 mm}	cm ³

Objem jedné vrstvy [cm³]

$$V_{\text{vrstvy}} = S \cdot a_p \quad (6.1)$$

Celkový odebraný materiál [cm³]

$$V_{\text{celk.}} = V_{\text{vrstvy}} \cdot n_{\text{vrstev}} \quad (6.2)$$

Celková doba obrábění [hod]

$$T_{\text{celk.}} = T_{\text{vrstvy}} \cdot n_{\text{vrstev}} \quad (6.3)$$

Úběr materiálu [cm³/hod]

$$Q = \frac{V_{\text{vrstvy}}}{T_{\text{vrstvy}}} \quad (6.4)$$

Životnost nástroje [hod]

$$T_{0,1 \text{ mm}} = \frac{T_{\text{celk.}} \cdot 0,1}{VB} \quad (6.5)$$

Celkový odebraný objem do otupení 0,1 mm [cm³]

$$V_{0,1 \text{ mm}} = \frac{V_{\text{celk.}} \cdot 0,1}{VB} \quad (6.6)$$

7 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Nejdůležitějším parametrem pro vybrání nejvhodnější řezné rychlosti je při zachování ostatních řezných podmínek celková cena za obrobení jednotky objemu. Na základě předchozího vyhodnocení je známa doba, jakou může nástroj při daných řezných podmínkách pracovat, než se stane nevyhovujícím, a objem materiálu, který nástroj za tento čas odebere. Aby bylo možné zjistit celkovou cenu za obrobení daného objemu materiálu, je potřeba znát sazbu stroje pro dané řezné podmínky.

Pro určení sazby stroje byl použit algoritmus, pro jehož zhotovení byla použita diplomová práce Ing. Richarda Kubiše s názvem *Analýza minutové sazby CNC strojů* z roku 2013 [20].

Matematický model je detailně propracovaný a bere v úvahu pořizovací cenu stroje, jeho odpisy, údržbu, prostorové náklady, energie, režijní materiál, náklady na obsluhu, údržbu, cenu nástrojů atd. Po doplnění tohoto matematického modelu o potřebné hodnoty související s provozem firmy Ing. Zdeněk Krátký a o hodnoty pro dané řezné podmínky byla vypočítána hodinová sazba stroje pro obrábění vysoko kalených ocelí danou řeznou rychlostí.

Matematický model byl zpracován v softwaru Excel. Číselné hodnoty jednotlivých parametrů nejsou zveřejněny, neboť se jedná o interní informace společnosti Ing. Zdeněk Krátký. Model je nastaven pro nepřetržitý provoz, kdy stroj pracuje 330 dní v roce, 24 hodin denně, obsluhován je celkem čtyřmi operátory. Samotná fréza je v řezu 50 % času celkového času obrábění. Parametrem, který se mění při výpočtu sazby stroje pro danou řeznou rychlost, je cena nástrojů za určité časové období – počet použitých nástrojů je pro každou řeznou rychlost jiný, neboť nástroje mají při různé řezné rychlosti rozdílnou životnost.

7.1 Číselné vyhodnocení provedených řezných zkoušek

Základní vstupní parametry pro výpočet dle zmíněného matematického modelu jsou v tab. 7.1. Ostatní údaje zůstaly nezveřejněny.

Tab. 7.1 Základní vstupní parametry pro výpočet sazby stroje.

Hod v provozu/den	24
Dnů v provozu/rok	330
Hod v provozu/rok	7920
Čisté frézování	50 %
Čisté frézování/rok t_f [hod]	3 960
Cena nástroje y [Kč]	686

Tab. 7.2 a tab. 7.3. obsahují všechny důležité údaje potřebné pro stanovení hledaného parametru, kterým je celková cena za obrábění jednotkového objemu materiálu [Kč/cm³]. Byly dopočítány hodnoty pro počet nástrojů/rok a jejich celková cena. Sazba stroje pro danou řeznou rychlost byla spočítána matematickým modelem. Na základě těchto údajů byly číselně určeny celkové náklady na obrábění pro danou řeznou rychlost.

Tab. 7.2 Seznam použitých parametrů při počítání celkových nákladů na obrábění.

Parametr	Označení	Jednotka
Počet nástrojů/rok (7.1)	n_N	-
Cena nástrojů/rok (7.2)	N_N	Kč
Sazba stroje pro danou v_c	N_s	Kč/hod
Cena nástroje	y	Kč
Čisté frézování/rok	t_f	hod
Celkové náklady na obrábění danou v_c (7.3)	N_c	Kč/cm ³

Počet nástrojů/rok

$$n_n = Z \cdot t_f \quad (7.1)$$

Cena nástrojů/rok

$$N_N = n_N \cdot y \quad (7.2)$$

Celkové náklady na obrábění danou v_c

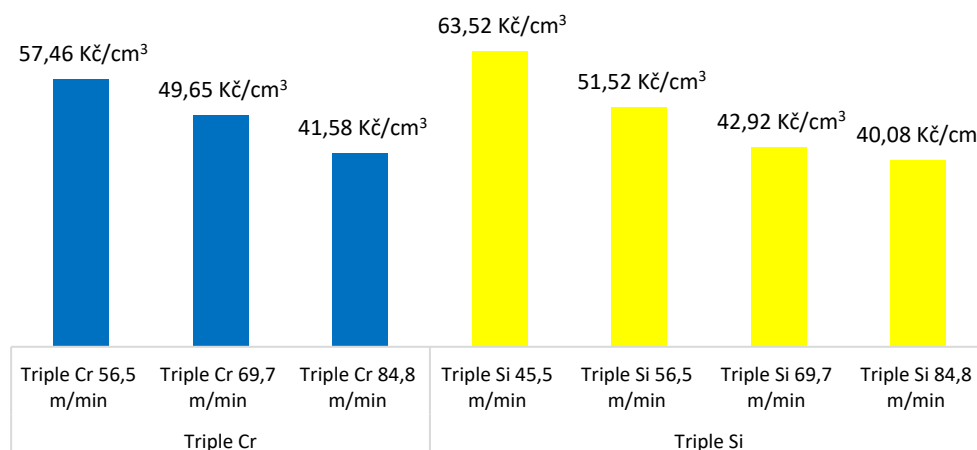
$$N_C = \frac{N_s}{Q} \cdot \frac{\text{Kč/hod}}{\text{cm}^3/\text{hod}} \quad (7.3)$$

Tab. 7.2 Přehled potřebných údajů pro výpočet celkových nákladů na obrábění.

Povlak	Triple Cr			Triple Si			
v_c [m/min]	56,5	69,7	84,8	45,5	56,5	69,7	84,8
Z [hod]	2,44	1,8	1,64	6,65	5,93	4,55	1,93
n_N [-]	1 623	2 200	2 415	595	668	870	2 052
N_N [Kč]	1 113 344	1 509 200	1 656 439	408 505	458 105	597 046	1 407 544
N_s [Kč/hod]	800,46	850,45	869,04	711,47	717,73	735,28	837,61
Q [cm ³ /hod]	13,93	17,13	20,90	11,20	13,93	17,13	20,90
$V_{0,1 \text{ mm}}$ [cm ³]	33,93	30,87	34,27	74,50	82,57	77,88	40,32
N_c [Kč/cm ³]	57,46	49,65	41,58	63,52	51,52	42,92	40,08

7.2 Grafické vyhodnocení nákladů na obrábění

Obr. 7.1 ukazuje, že nástroje opatřené povlakem Triple Si dosáhly ve všech případech lepších výsledků než nástroje opatřené povlakem Triple Cr. Ekonomika obrábění je i přes použití většího počtu nástrojů pro obrábění daného objemu lepší při vyšších řezných rychlostech. Nejlepší volbou je použití nástroje s povlakem Triple Si při hodnotě $v_c = 84,8$ m/min.



Obr. 7.1 Celkové náklady na obrábění danou v_c [Kč/cm³].

7.3 Diskuze dosažených výsledků

Z hlediska životnosti se u povlaku Triple Cr nedá jednoznačně určit, která varianta řezné rychlosti je nejvýhodnější. Ve všech případech bylo dosaženo podobných výsledků. Více materiálu zvládly odebrat nástroje pracující buď rychlostí nižší (56,5 m/min), nebo naopak vyšší (84,8 m/min). Při výpočtu ekonomiky obrábění je nejlepší volba řezná rychlost, 84,8 m/min.

U povlaku Triple Si jsou výsledky jasnější. Při obrábění nejvyšší řeznou rychlostí nástroj odebere poloviční množství materiálu, než kdyby pracoval rychlostí nižší. Nástroj měl nejdelší životnost při rychlosti 56,6 m/min, ale nejlevněji pracuje při 84,8 m/min.

Z dvojice testovaných povlaků se pro obrábění vysoce kalených ocelí ukázal povlak Triple Si jako vhodnější volba. Tento povlak zlepšuje mechanické vlastnosti nástroje tak, že jeho životnost je při stejných řezných podmínkách delší, než kdyby byl nástroj chráněn povlakem Triple Cr. Celkové náklady na obrábění jsou při volbě povlaku s křemíkem nižší než u chromové varianty. Při frézování nejvyšší testovanou řeznou rychlostí (84,8 m/min) je rozdíl mezi jednotlivými povlaky 1,50 Kč na 1 cm³ materiálu.

ZÁVĚR

Firmy zabývající se výrobou obráběcích nástrojů většinou svým zákazníkům poskytují katalog, který obsahuje především informace o nástrojích, doporučených řezných podmínkách a o doporučeném použití daných nástrojů.

Pro stanovení ideálních řezných podmínek pro danou aplikaci by bylo zapotřebí provést rozsáhlý test daného nástroje v reálných podmínkách. Ani to však nezaručuje úplnou optimalizaci výchozích obráběcích podmínek. Ty se liší dle charakteru výrobní operace i celého výrobního procesu. Řezné podmínky se liší při hrubování a při dokončování, jsou odlišné pro obrábění různých materiálů. Mohou být ovlivněny také obráběcím strojem a jeho parametry, požadavky na kvalitu a přesnost obrobeneho povrchu atd. Konkrétní nastavení je tedy individuální a řezné podmínky stanovené výrobcem jsou pouze doporučené.

Řezné podmínky se výrazně promítají do ekonomiky obrábění. Předmětem této práce bylo nalezení vhodné řezné rychlosti pro frézování daným nástrojem, kdy kritériem pro vyhodnocení byla cena obrábění jednotkového objemu materiálu. Pro testování byl vyčleněn poměrně nízký počet nástrojů. Naměřená a vypočtená data mají spíše informativní charakter. Ukázalo se, že obrábění řeznými podmínkami, které zaručují delší životnost nástroje, může být finančně nákladnější, než obrábění podmínkami, při kterých se nástroj otupí podstatně dříve.

Testovaný nástroj je nabízen ve dvojnásobném provedení – opatřen dvěma různými typy povlaků. Na základě naměřených dat byl z hlediska životnosti i ekonomiky vybrán vhodnější povlak pro daný typ obráběcí operace.

V práci byl naznačen postup pro vyhodnocení vhodnosti řezných podmínek z hlediska nákladů na obrábění jednotkového objemu. Rozsah testování nebyl dostatečně velký, aby bylo možné stanovit pásmo ideálních hodnot hledaného parametru – řezné rychlosti. Test může posloužit jako základ pro další experimenty, kdy může být zkoumána vhodnost použitého nástrojového materiálu, vliv velikosti nástroje, vliv chlazení aj. Tyto a další potenciální parametry mohou být porovnány na základě více kritérií (životnost, ekonomika).

Závěrem lze konstatovat, že všechny cíle bakalářské práce byly splněny.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Obrábění. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. San Francisco, 2016 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Obrábění>
- [2] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-214-1996-2.
- [3] NĚMEC, Dobroslav, Jan ODEHNAL a Jaroslav HNILICA. *Strojírenská technologie. Díl 3., Strojní obrábění. 2., opravené vyd.* Praha: SNTL, 1982.
- [4] KUDELA, Miroslav. *Průručka obrábění: kniha pro praktiky*. Praha: Scientia, 1997. ISBN 91-972-2994-6.
- [5] OHNŮT, Adam. *Návrh a výroba jednoručního otvíráku*. Zlín, 2014. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Ondřej Bílek. Ph.D.
- [6] HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 1. část* [online]. Studijní opory pro magisterskou formu studia. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2003, 138 s. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [7] SOVA, František. *Technologie obrábění a montáže*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2001, 273 s. ISBN 80-7082-823-4.
- [8] ŘASA, Jaroslav, GABRIEL, Vladimír. *Strojírenská technologie 3 : Metody, stroje a nástroje pro obrábění*. 1. vyd. Praha 6 - Břevnov : Scientia, 2000. 256 s.
- [9] Nástrojářská konzolová frézka. In: *TOS Olomouc* [online]. Olomouc [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <https://www.tos-olomouc.cz/cz/vyrobni-program/univerzalni-produkci-frezky/nastrojarska-konzolova-frezka-fnk2-r/fotogalerie.html#prettyPhoto>
- [10] *Technická příručka obrábění: soustružení, frézování, vrtání, vyvrtávání, upínání nástrojů*. Praha: Sandvik Coromant, 2005, [601] s.
- [11] ONDŘEJ, Zindulka. Moderní metody povlakování nástrojů. *MM spektrum: Průmyslové spektrum* [online]. Praha, 2004 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-metody-povlakovani-nastroju.html>
- [12] HOŘEJŠ, Slavomír. Povlakování nástrojů metodou PACVD. *MM spektrum: Průmyslové spektrum* [online]. Praha, 2008 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/dokument/rtiHvmxzw7nwaDEJ>
- [13] PVD based processes: The PVD processes. *Oerlikon* [online]. Pfäffikon [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <https://www.oerlikon.com/balzers/com/en/portfolio/surface-technologies/pvd-processes/>
- [14] TripleCoating SI: PVD povlaky. *SHM-cz* [online]. Šumperk [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/pvd-povlaky-a-sluzby/pvd-povlaky/triplecoating-si/>
- [15] TripleCoating Cr: PVD povlaky. *SHM-cz* [online]. Šumperk [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.shm-cz.cz/pvd-povlaky-a-sluzby/pvd-povlaky/triplecoating-cr/>

-
- [16] ISO H Tvrzená ocel. *SANDVIC Coromant* [online]. Sandviken [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_h_hardened_steel/pages/default.aspx
- [17] CVD povlakování. In: *Böhler Uddeholm* [online]. [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.bohler-uddeholm.cz/media/CVD.pdf>
- [18] Katalog nástroje a technologie K-TOOLS. In: *K-TOOLS* [online]. Zlín [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.k-tools.cz/aktuality/20150924154452.pdf>
- [19] DRUHY OPOTŘEBENÍ BŘITU: Druhy opotřebení břitů nástroj. In: *Taegutec: Member IMC Group* [online]. Daegu [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: http://www.taegutec.cz/innotool/prirucka_obrabeni_321.pdf
- [20] KUBIŠ, Richard. *Analýza minutové sazby CNC strojů*. Brno 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 75 s. Prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
- [21] KRÁTKÝ Zdeněk. *Logo firmy* [USB disk]. 5. května 2017. [cit. 2017-05-07]

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

SYMBOL	JEDNOTKA	POPIS
a_e	mm	šířka řezu
a_p	mm	hloubka řezu
D	mm	průměr frézy
f_z	mm	posuv na zub
N_C	Kč/cm ³	celkové náklady na obrábění danou v_c
n_N	-	počet nástrojů/rok
N_N	Kč	cena nástrojů/rok
N_S	Kč/hod	sazba stroje pro danou v_c
n_{vrstev}	-	počet odebraných vrstev
Q	cm ³ /hod	úběr materiálu
S	mm ²	plocha obráběné vrstvy
$T_{celk.}$	hod	celková doba obrábění
t_f	hod	čisté frézování/rok
T_{vrstvy}	hod	doba frézování jedné vrstvy
$V_{0,1\text{ mm}}$	cm ³	celkový odebraný objem do otupení 0,1 mm
VB	mm	šířka otupení na hřbetu
v_c	m/min	řezná rychlost
$V_{celk.}$	cm ³	celkový objem odebraného materiálu
v_f	mm/min	posuv
V_{vrstvy}	cm ³	objem jedné vrstvy
y	Kč	cena nástroje
z	-	počet zubů
Z	hod	životnost nástroje

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

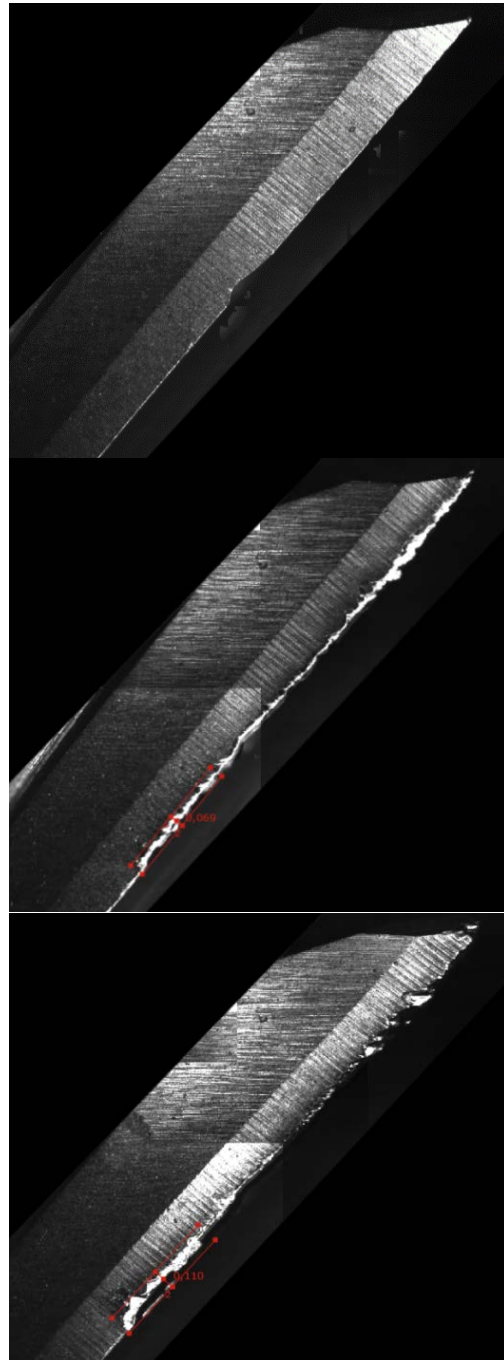
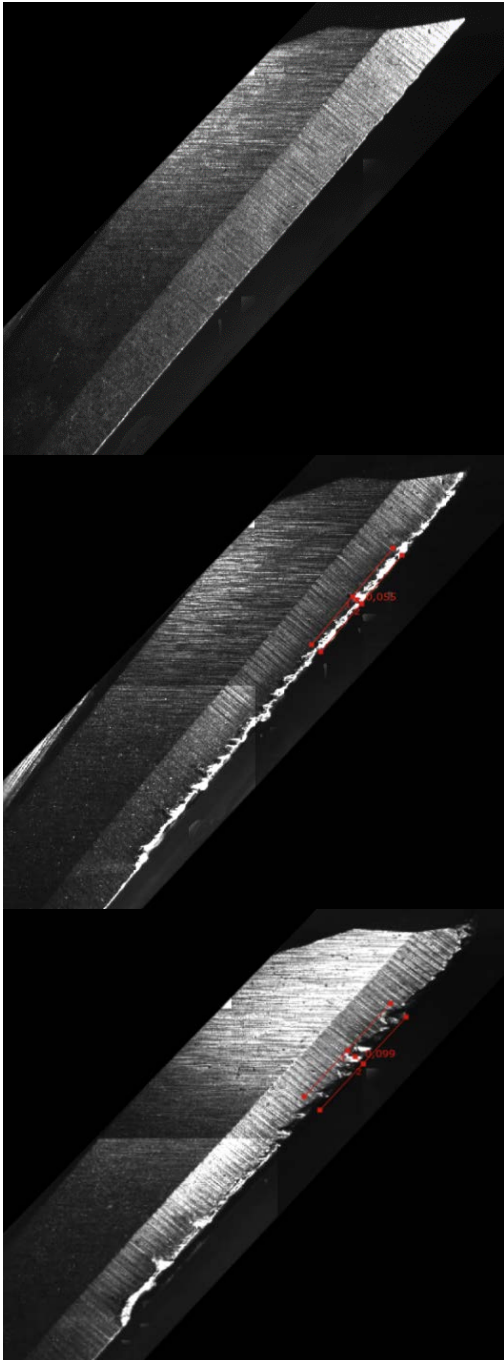
ZKRATKA	POPIS
CNC	Computer Numerical Control – číslicové řízení pomocí počítače
CVD	Chemical Vapour Deposition – chemická depozice par
PACVD	Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition – chemická depozice pomocí plazmatu
PVD	Physical Vapour Deposition – fyzikální depozice par

SEZNAM PŘÍLOH

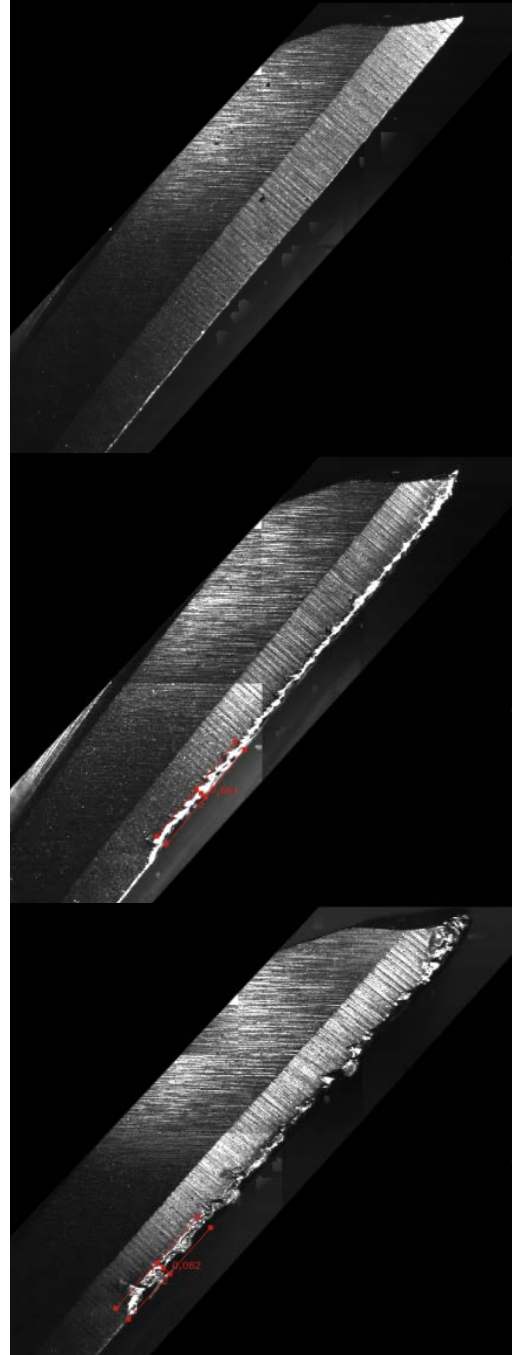
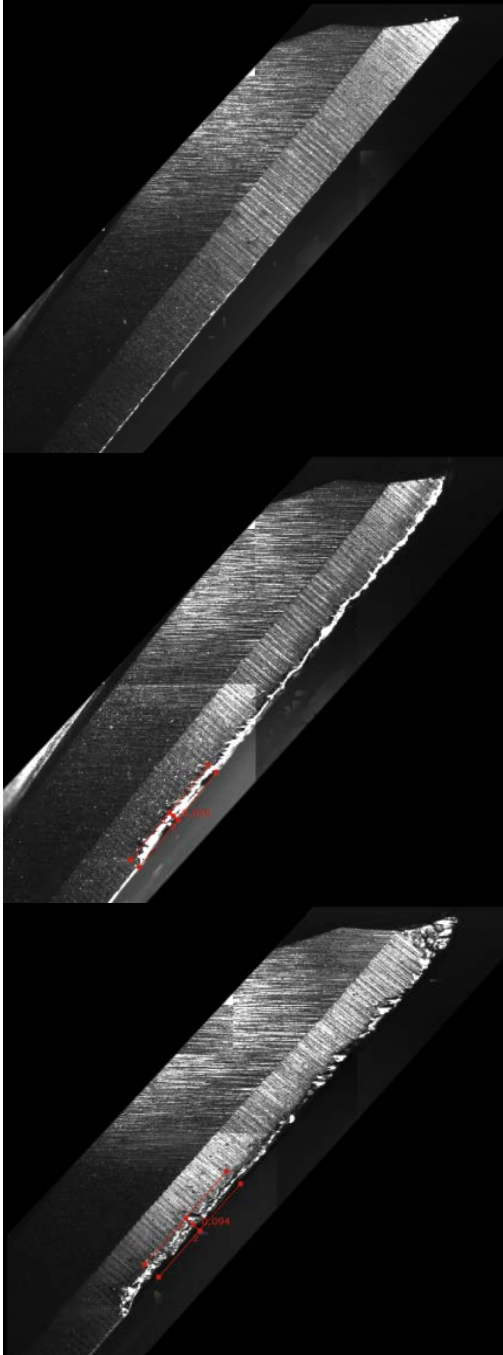
Příloha 1	Řezné podmínky pro testování
Příloha 2	Proměrování nástroje na ZOLLER – genius 3s - pilot 3.0.
Příloha 3	Vývoj otupení pro povlak Triple Cr a $v_c = 56,5$ m/min – 2 zuby
Příloha 4	Vývoj otupení pro povlak Triple Cr a $v_c = 69/7$ m/min – 2 zuby
Příloha 5	Vývoj otupení pro povlak Triple Cr a $v_c = 84,8$ m/min – 2 zuby
Příloha 6	Vývoj otupení pro povlak Triple Si a $v_c = 56,5$ m/min – 1 zub
Příloha 7	Vývoj otupení pro povlak Triple Si a $v_c = 69/7$ m/min – 1 zub
Příloha 8	Vývoj otupení pro povlak Triple Si a $v_c = 84,8$ m/min – 2 zuby
Příloha 9	Vývoj otupení pro povlak Triple Si a $v_c = 45,2$ m/min – 1 zub

TEST NÁSTROJE - obrábění vysoce kalených ocelí											K-TOOLS®		
řezné podmínky	Použití	Označení nástroje	Obráběný materiál	ϕ_{d_1} [mm]	z	v_c [m/min]	f_z [mm]	a_p [mm]	a_e [mm]	n [min ⁻¹]	v_f [mm/min]	Počet průchodů	T_c vrstvy [min]
TEST - KALENÉ Válcová fréza 11-3640X, 11-3640T	19 437-63HRC	11-3640X	19 437	6	4	56,5	0,060	2,00	0,160	3 000	720	313	74
	$v_c = 56,5$ m/min	11-3640X	19 437	6	4	69,7	0,060	2,00	0,160	3 700	888	313	60
	$v_c = 69,7$ m/min	11-3640X	19 437	6	4	84,8	0,060	2,00	0,160	4 500	1 080	313	49
	$v_c = 84,8$ m/min	11-3640X	19 437	6	4	45,2	0,060	2,00	0,160	2 400	576	313	92
		11-3640T	19 437	6	4	56,5	0,060	2,00	0,160	3 000	720	313	74
		11-3640T	19 437	6	4	69,7	0,060	2,00	0,160	3 700	888	313	60
		11-3640T	19 437	6	4	84,8	0,060	2,00	0,160	4 500	1 080	313	49

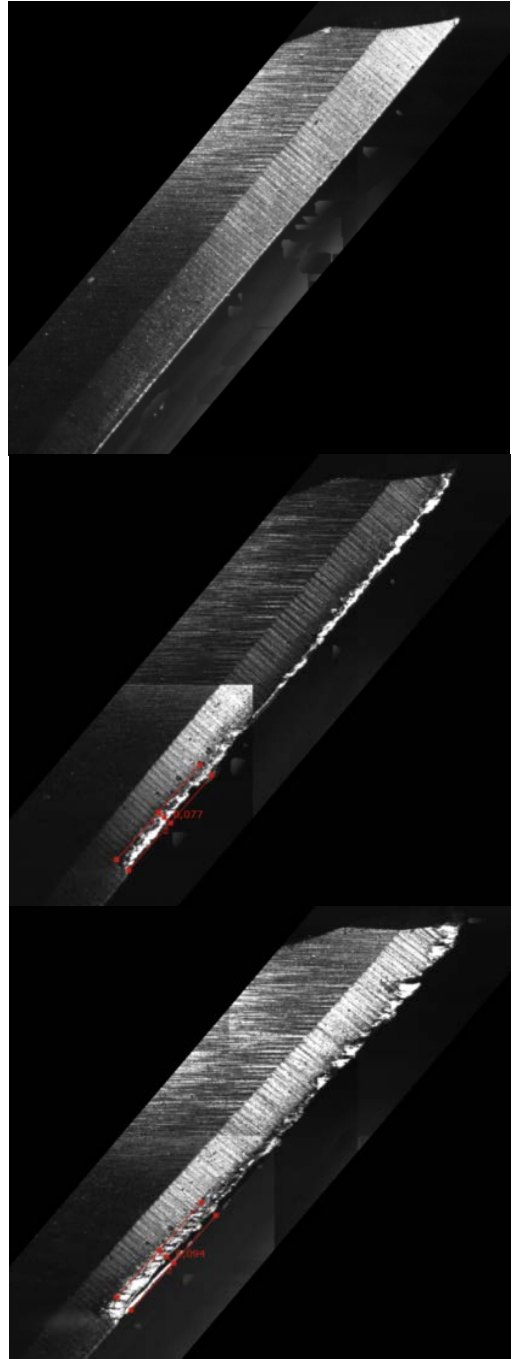
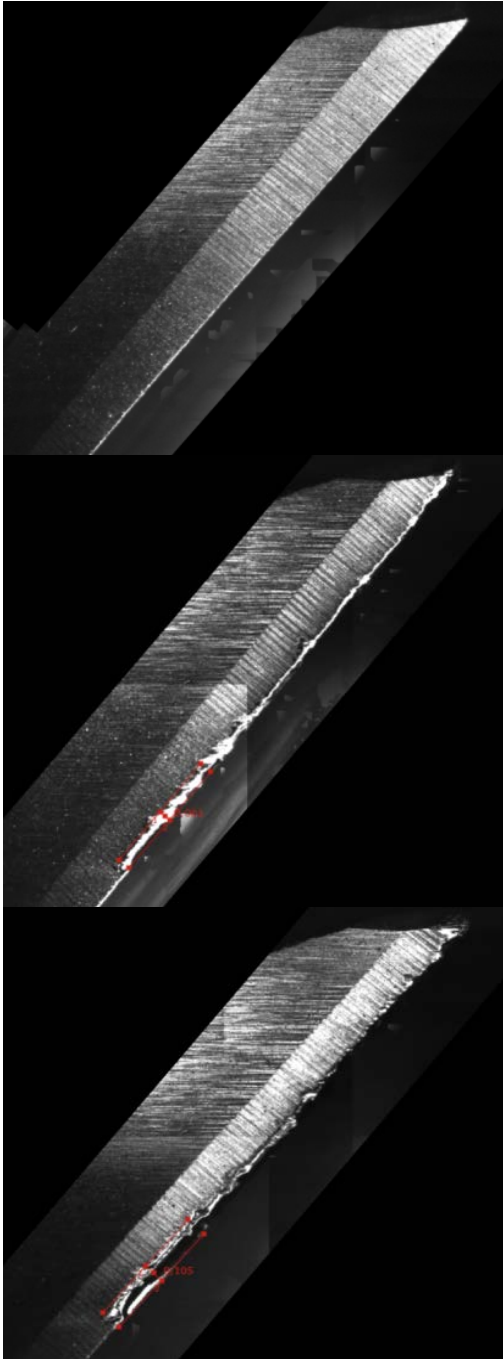
Triple Cr a $v_c = 56,5$ m/min – 2 zuby



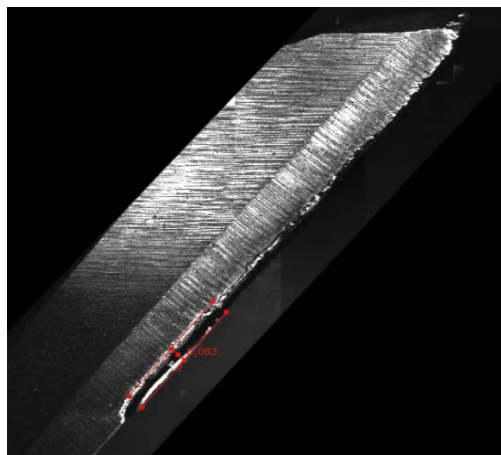
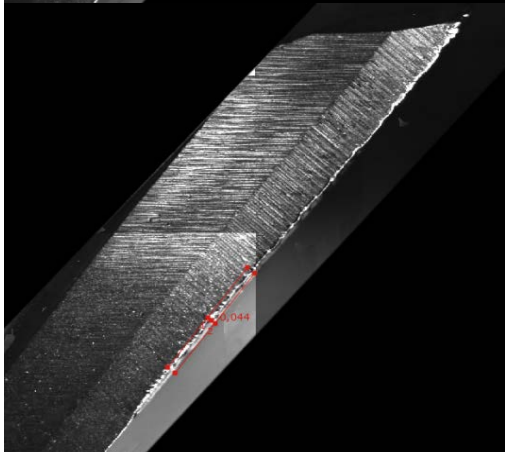
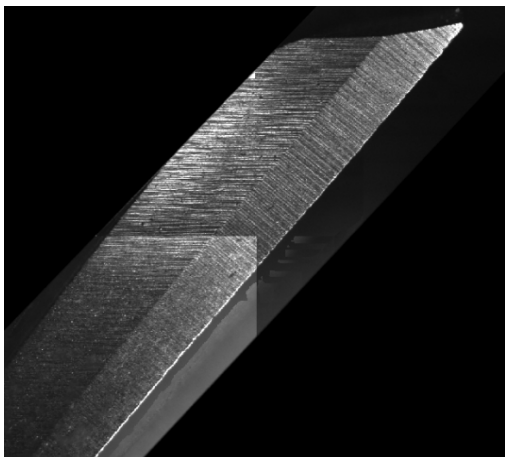
Triple Cr a $v_c = 69/7$ m/min – 2 zuby



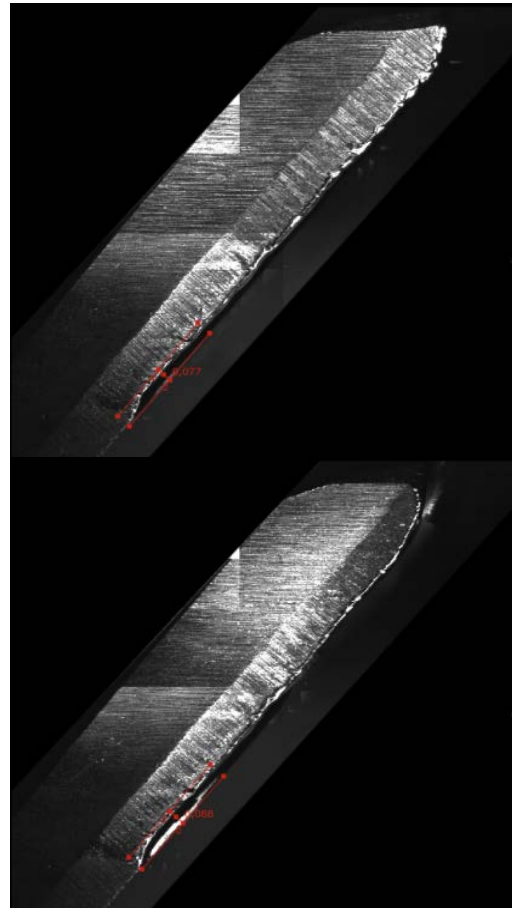
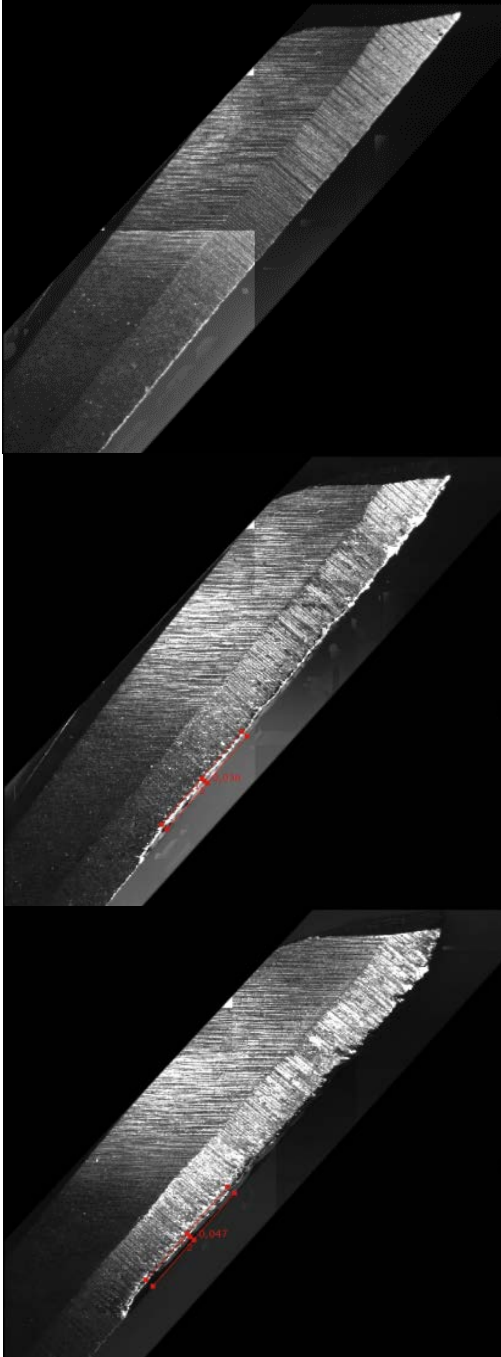
Triple Cr a $v_c = 84,8$ m/min – 2 zuby



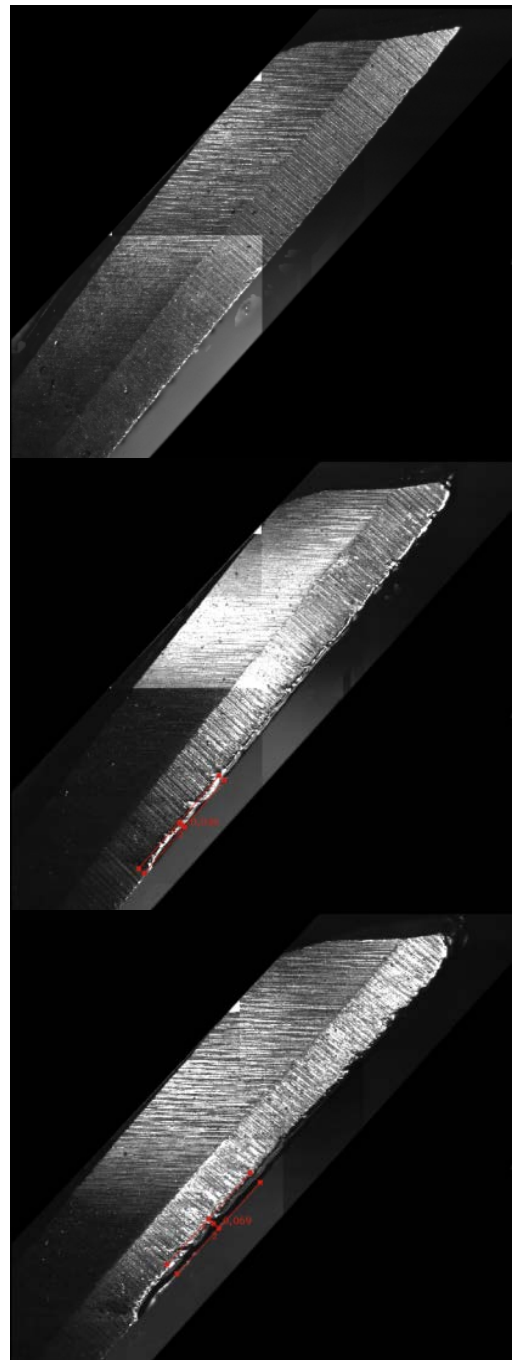
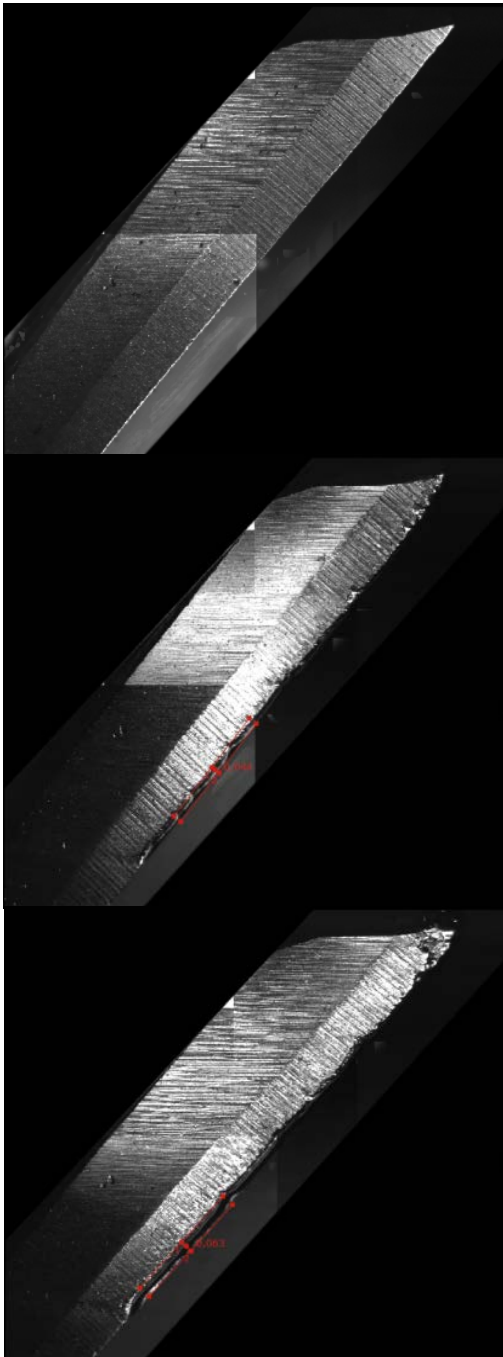
Triple Si a $v_c = 56,5$ m/min – 1 zub



Triple Si a $v_c = 69/7$ m/min – 1 zub



Triple Si a $v_c = 84,8$ m/min – 2 zuby



Triple Si a $v_c = 45,2$ m/min – 1 zub

