

Návrh nástroje pro frézování kaleného materiálu

Roman Olszar

Bakalářská práce
2022

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Roman Olszar
Osobní číslo:	T19316
Studijní program:	B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Technologická zařízení
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Návrh nástroje pro frézování kaleného materiálu

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární rešerši se zaměřením na obrábění kalených materiálů.
2. Navrhněte nástroje pro obrábění kaleného materiálu.
3. Navržené nástroje otestujte a porovnejte v reálném provozu.
4. Zhodnotte dosažené výsledky.

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

SMITH, Graham T. *Cutting tool technology: industrial handbook*. London: Springer, [2008], xii, 599 s. ISBN 9781848002043.
HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing, 2008, 235 s. ISBN 9788025422502.
KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 9788072047222.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Bednařík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **3. ledna 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2022**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 24. února 2022

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Bakalářská práce obsahuje popis tepelného zpracování oceli, procesu frézování a frézovacích nástrojů. V praktické části byl proveden experiment, ve kterém bylo navrženo deset fréz s rozdílnou nástrojovou geometrií. Následně byly tyto frézy vyrobeny a otestovány na CNC obráběcím centru. Po zpracování výsledků proběhla diskuze, ve které byla vyhodnocena a zvolena nejvhodnější nástrojová geometrie frézy pro obrábění kaleného materiálu.

Klíčová slova: frézování, měření úhlů, slinuté karbidy, kalená ocel, frézy

ABSTRACT

The bachelor thesis contains a description of heat treatment of steel, milling process and milling tools. In the practical part was performed an experiment in which were designed ten milling cutters with different tool geometries. Subsequently, these milling cutters were manufactured and tested on a CNC machine. After processing the results, a discussion took place, in which the most suitable tool geometry of the milling cutter for machining hardened material was evaluated and selected.

Keywords: milling (metal-work), angle measurement, sintered carbides, hardening of steel

Mé poděkování patří vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Martinu Bednařikovi Ph.D. za užitečné rady, ochotu a pomoc při veškerých konzultacích při psaní této práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Jiřímu Kruckému a firmě JK Nástroje s.r.o. za možnost provedení praktické části a pomoc při volbě tématu. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat manželce a rodině za všechnu podporu, pomoc a trpělivost.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD.....	10
I. TEORETICKÁ ČÁST	11
1 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ OCELI.....	12
1.1 BINÁRNÍ DIAGRAM ŽELEZO-UHLÍK.....	12
1.1.1 AUSTENIZACE.....	13
1.1.2 MARTENZITICKÁ PŘEMĚNA	14
1.1.3 BAINITICKÁ PŘEMĚNA	15
1.2 KALENÍ	16
1.2.1 ZÁKLADNÍ POJMY.....	17
1.3 ZPŮSOBY KALENÍ.....	17
1.3.1 MARTENZITICKÉ KALENÍ	18
1.3.2 BAINITICKÉ KALENÍ.....	19
2 FRÉZOVÁNÍ.....	20
2.1 ZÁKLADNÍ POJMY FRÉZOVÁNÍ.....	20
2.2 ŘEZNÉ PODMÍNKY	21
3 FRÉZOVACÍ NÁSTROJE	24
3.1 UMÍSTĚNÍ BŘITŮ	24
3.2 PRŮBĚH OSTRÍ ZUBŮ	24
3.3 ROZTEČ ZUBŮ	24
3.4 UPÍNÁNÍ FRÉZY	25
3.5 KONSTRUKCE NÁSTROJE	25
3.6 GEOMETRIE BŘITU FRÉZY	26
3.7 MATERIÁL NÁSTROJE.....	26
3.7.1 SLINUTÝ KARBID	27
3.7.2 RYCHLOŘEZNÁ OCEL	28
3.8 POVLAKOVÁNÍ	28
3.8.1 ZÁKLADNÍ METODY POVLAKOVÁNÍ.....	28
II. PRAKTICKÁ ČÁST	30
4 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....	31
5 NÁVRH GEOMETRIE NÁSTROJŮ.....	32
6 VÝROBA A KONTROLA NAVRŽENÝCH NÁSTROJŮ.....	34
6.1 PŘÍPRAVA POLOTOVARU	34

6.2 VÝROBA NÁSTROJŮ	35
6.3 KONTROLA VYROBENÝCH NÁSTROJŮ.....	38
6.3.1 NAMĚŘENÉ HODNOTY	39
7 TESTOVÁNÍ NAVRŽENÝCH NÁSTROJŮ	42
7.1 OBRÁBĚNÝ MATERIÁL.....	42
7.2 STROJ	43
7.3 ŘEZNÉ PODMÍNKY	45
7.4 VYHODNOCOVÁNÍ VÝSLEDKŮ.....	46
8 DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	54
ZÁVĚR.....	57
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	58
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	60
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	61
SEZNAM TABULEK	63

ÚVOD

S rychlým pokrokem současných technologií a s ním spojeným zvyšováním nároků na přesnost výroby se firmy potýkají s problematikou obrábění kaleného materiálu. Jedná se o materiál, který je velmi tvrdý, má své specifické vlastnosti a při jehož obrábění nelze použít běžné nástroje. Obrábění kaleného materiálu se v dnešní době již stalo běžnou součástí našeho průmyslu. Na trhu samozřejmě lze zakoupit nástroje, které jsou přímo určeny pro frézování kaleného materiálu, ale nástrojová geometrie těchto nástrojů však zůstává jakýmsi firemním „know how“ a tyto informace nejsou běžně dostupné. Proto se tato bakalářská práce bude zabývat testováním různých kombinací nástrojových geometrií a s tím svázanou účinností fréz, které jsou určeny pro obrábění kaleného materiálu.

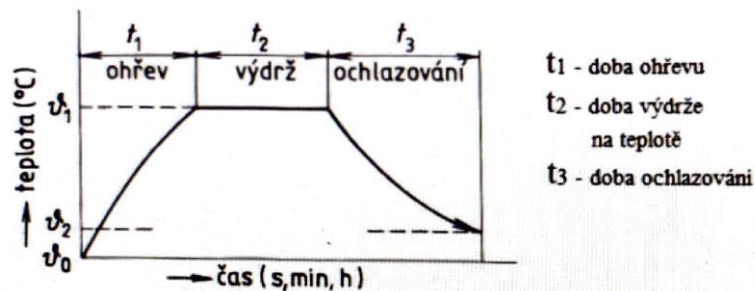
Práce bude rozdělena na praktickou a teoretickou část. V teoretické části se dozvíme něco o tepelném zpracování oceli, budou zde popsány vnitřní struktury materiálu po působení tepelného zpracování, popsána metodika kalení, technologie frézování a také bude popsána charakteristika nástrojů vhodných pro frézování kaleného materiálu.

V praktické části bude proveden experiment srovnáním deseti fréz s různou nástrojovou geometrií – budou testovány různé kombinace úhlu čela zubové drážky a úhlu hřbetu. Nejprve bude popsána výroba těchto fréz a následně hodnoceno jaká kombinace nástrojové geometrie je pro frézování kaleného materiálu nejvhodnější.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ OCELI

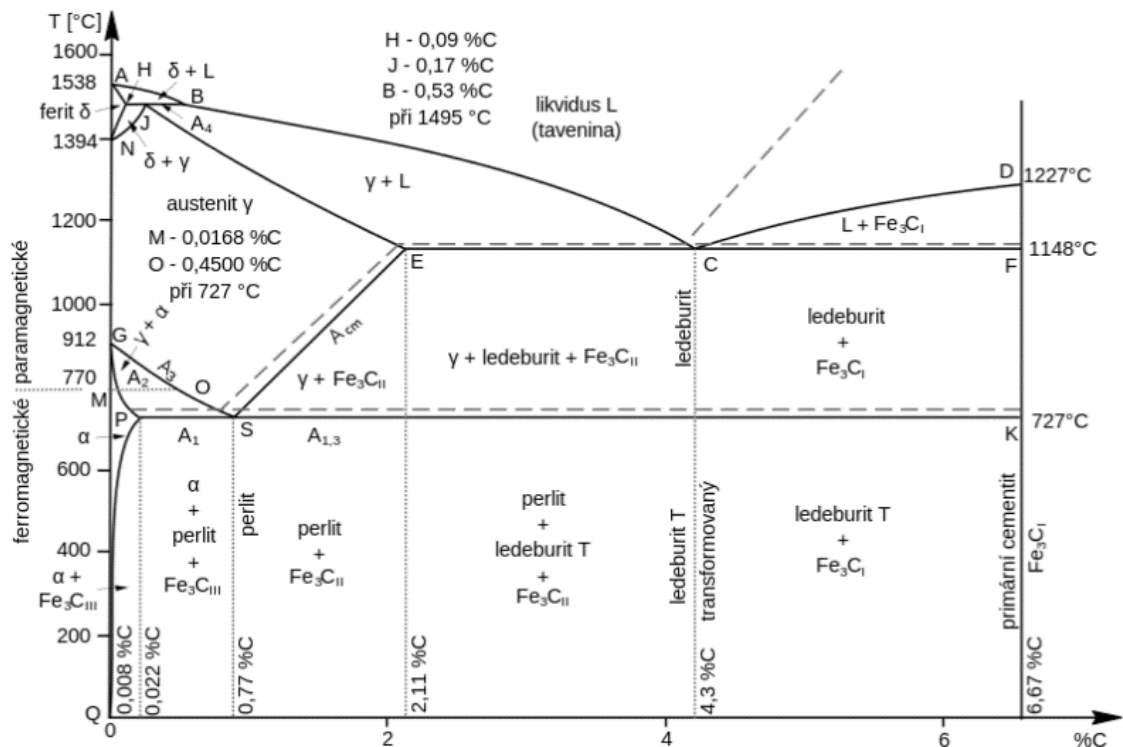
Jednou z nejdůležitějších vlastností oceli je její rozsáhlá schopnost měnit mechanické a fyzikální vlastnosti podrobením kontrolovanému tepelnému zpracování. To zahrnuje všechny postupy, při nichž předmět nebo materiál záměrně ohříváme a ochlazujeme určitým způsobem tak, abychom docílili požadovaných změn v metalurgické struktuře, tím pádem i změn vlastností kovových součástí. Při tomto procesu jde v podstatě vždy o souhrn těchto operací: ohřívání materiálu určitou rychlostí na danou teplotu, výdrž na této teplotě a ochlazování určitou rychlostí na konečnou teplotu. Někdy se tyto operace opakují víckrát za sebou za různých podmínek. [1; 2]



Obrázek 1 Schéma průběhu tepelného zpracování [2]

1.1 Binární diagram železo-uhlík

Tento diagram znázorňuje vnitřní stavbu oceli a bílých litin v závislosti na teplotě a na obsahu uhlíku. Binární rovnovážný diagram se používá ve slévárnách a při tepelném zpracování oceli a litin. Ukazuje, jaké složení tuhnutí směsi získáme při znázorňovaných koncentracích a teplotách. Na složení směsi závisí vlastnosti ztuhlého materiálu. Diagram se nazývá rovnovážný, protože při jeho tvorbě byla soustava v rovnovážném stavu díky velmi pomalému průběhu teplotních změn. [3]



Obrázek 2 Rovnovážný diagram metastabilní (plnná čára) soustavy železo–uhlík (čárkovaná čára označuje rovnovážný stabilní soustavy slitiny) [4]

Diagram zahrnuje tyto fáze:

- Ferit je tuhý roztok uhlíku v Fe_{α} .
- Austenit je tuhý roztok uhlíku v Fe_{γ} .
- Delta ferit je tuhý roztok uhlíku v Fe_{δ} ,
- Cementit je intersticiální sloučenina železa a uhlíku.
- Grafit je uhlík krystalizující v šesterečné soustavě.
- Eutektikum v metastabilní soustavě se nazývá ledeburit, při eutektické teplotě se skládá z austenitu a cementitu.
- Eutektikum ve stabilní soustavě se nazývá grafitické eutektikum, při eutektické teplotě se skládá z austenitu a grafitu.
- Eutektoid v metastabilní soustavě se nazývá perlit a skládá se z feritu a cementitu [4]

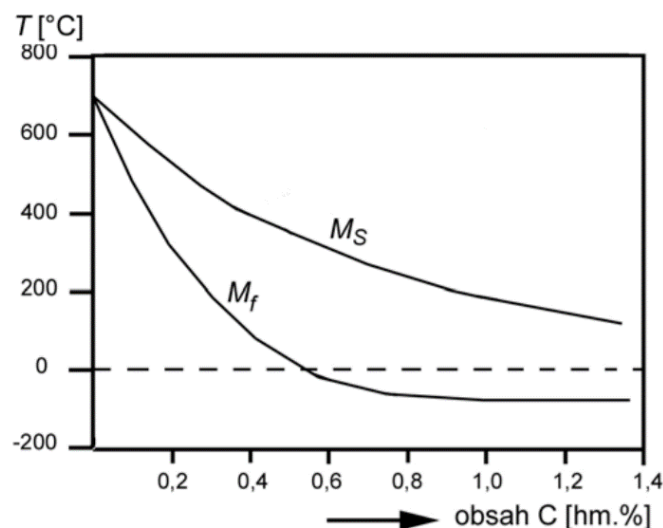
1.1.1 Austenizace

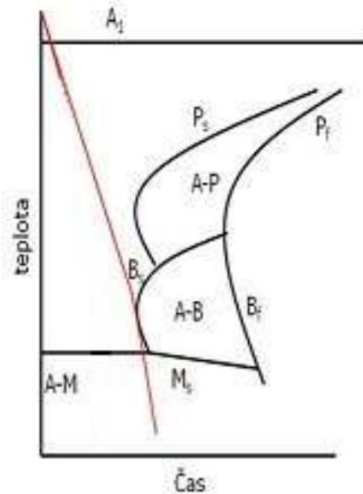
Jedná se o základní proces, který probíhá v rámci procesu kalení. Jde o ohřev nad kritickou teplotu (tzv. austenitizační), při které se mění feriticko-cementitická struktura na strukturu austenitickou. Při austenitizaci dochází ke dvěma hlavním jevům. Jedná se o tvorbu a

homogenizaci austenitu a následný růst austenitického zrna. Za rovnovážných podmínek dochází k procesu přeměny feriticko-cementitické struktury na austenit v rozmezí teplot A_1 (eutektoidní oceli), A_1 až A_3 (podeutektoidní oceli), nebo A_1 až A_{cm} (nadeutektoidní oceli)- viz obr. 2. Austenitizace začíná přeměnou perlitu na austenit a při dalším zvyšování teploty nad A_1 , se následně v austenitu rozpouští ferit nebo cementit. Jedná se o difuzní přeměnu, při které se tvoří zárodky austenitu s postupným růstem. Průběh austenitizace je ovlivňován nejen teplotou a rychlostí ohřevu, ale i výchozí strukturou a složením oceli. [1; 2; 5]

1.1.2 Martenzitická přeměna

K martenzitické přeměně dochází při dostatečně rychlém ochlazení z austenitizační teploty, překročení teploty pod teplotu M_s (martenzit start) a ukončením teplotou M_f (martenzit finiš) (obr. 3). Krystalografická mřížka se změní z krychlové plošně středěné na tetragonální prostorově středěnou, ve které je uzavřeno v intersticiálních polohách poměrně velké množství atomů uhlíku. To se navenek projevuje zvýšenou tvrdostí a křehkostí součástí (velká vnitřní pnutí). Při tomto procesu se všechny austenit nepřemění v martenzit, a tak ve struktuře oceli zůstává tzv. zbytkový austenit. Tato fáze je měkká, nestabilní a tudíž nežádoucí. Ke snížení množství zbytkového austenitu se používá popouštění, nebo zmrazení. To je požadováno např. u speciálních nástrojů, kdy by pozdější rozpad zbytkového austenitu mohl vnést do struktury nežádoucí pnutí a deformace. Jeho podíl také závisí na obsahu uhlíku (obr. 3) některých legujících prvků, rychlosti ochlazování, popřípadě prodlevě v intervalu $M_s - M_f$. Na obr. 4 je znázorněna tzv. kritická rychlost, kde se austenit transformuje pouze na martenzit s jistým podílem zbytkového austenitu. [4; 1; 3]



Obrázek 3 Závislost teplot (M_s) a (M_f) na obsahu uhlíku v austenitu před kalením [4]

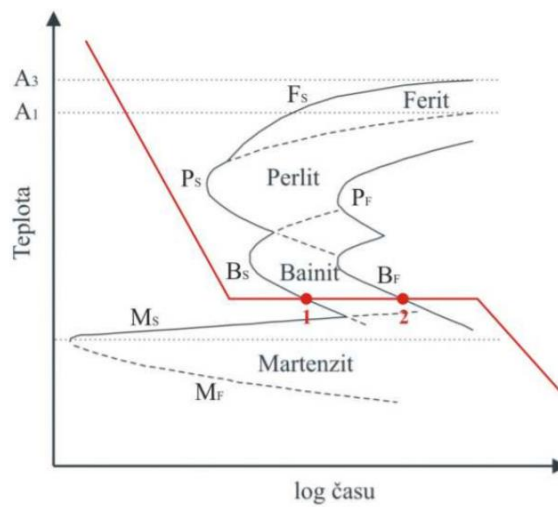
Obrázek 4 Rychlost ochlazování v ARA diagramu- transformace austenitu na martenzit [4]

1.1.3 Bainitická přeměna

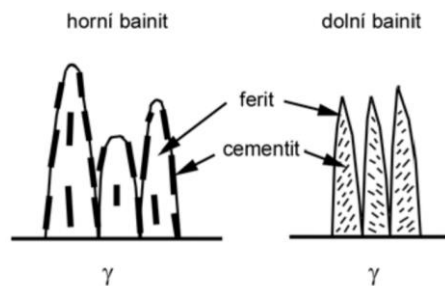
Bainitická přeměna se vyznačuje částečnou difúzí, která se omezuje pouze na uhlík. K bainitické přeměně dochází mezi teplotami cca 550°C a M_s (obr. 5). Bainit je tvořen jehlicovitými krystaly α -feritu přesyceného uhlíkem a velmi jemnými částicemi cementitu. Takto utvořená struktura má oproti martenzitické nižší tvrdost, ale vyšší houževnatost. Například při izotermickém zušlechťování vzniklá bainitická struktura má požadované vlastnosti, proto po zakalení není nutné popouštění. Podobně jak u martenzitické, tak u bainitické přeměny dochází ke vzniku zbytkového austenitu, který vzhledem ke své menší pevnosti snižuje pevnost vzniklého bainitu. Struktura je závislá na teplotě přeměny a rychlosti ochlazování. Dle toho pak vznikají následující dva druhy [3]:

Horní bainit – (0,6%C nad 350°C) vzniká za nižší ochlazovací rychlosti a tvoří ho svazky bainitického feritu ve tvaru hrubších jehlic (latěk), které rostou na hranicích austenitického zrna podél určitých rovin austenitu.

Dolní bainit – (pod 350°C do M_s) vzniká při vyšší ochlazovací rychlosti a strukturu tvoří tenké desky bainitického feritu vyrůstající podél krystalografických rovin převážně od hranic austenitu. Jsou více přesyceny uhlíkem. Velmi jemný cementit se nachází uvnitř feritických jehlic. [6; 1; 5]



Obrázek 5 Průběh rychlosti ochlazování IRA diagram -transformace austenitu na bainit [4]



Obrázek 6 Mikrostruktura horního a dolního bainitu [6]

1.2 Kalení

Kalení je jedním ze způsobů tepelného zpracování za účelem zlepšení určitých mechanických a fyzikálních vlastností. Pro některé strojní součásti z konstrukční oceli a skoro všechny nástroje je nezbytná povrchová tvrdost a vysoká odolnost proti opotřebení. Tyto vlastnosti získáme zakalením.

Princip kalení spočívá v přeměně perliticko feritické struktury na strukturu martenzitickou, nebo bainitickou. V praxi dochází k ohřevu součástí na teplotu okolo 800°- 900°C, výdrž na této teplotě (austenizace) a následném ochlazování, které je velmi rychlé (nadkritickou rychlostí). Takovým zpracováním získáme nerovnovážnou strukturu. [1; 4]

Vlastnosti jako vysoká tvrdost a odolnost proti opotřebení, jsou spojeny se vznikem nerovnovážné struktury martenzitu (anizotermické kalení), popř. bainitu (izotermické kalení). Výsledné vlastnosti ovlivňuje také velikost martenzitických jehlic. Jak je zmíněno v předchozí kapitole, jemnozrnnost, respekt. hrubozrnnost martenzitických jehlic je závislá na kalicí teplotě a rychlosti ochlazování. Závisí však i na dalších faktorech např. legury v oceli atd.. Kalení je však zakázáno u ocelových součástek a strojních dílů, které by při nečekaném prasknutí mohly způsobit úraz. Například pro kované háky u zvedacích zařízení platí zásada, že při nadměrném přetížení se musí hák natahovat a tím varuje obsluhu. [4; 2; 1]

1.2.1 Základní Pojmy

Nezbytnou vlastností součástí po kalení je nejen tvrdost, ale i hloubka zakalení, resp. možnost zakalení součásti v celém průřezu. Aby bylo možné ocel účinně zakalit, musí splňovat určité požadavky:

Kalitelnost - schopnost materiálu dosáhnout nerovnovážné martenzitické struktury a získat tvrdost. Je zásadně ovlivněna obsahem uhlíku. Kalit můžeme oceli s obsahem uhlíku nad 0,35 %, kdy již lze zaručit vznik zákalné struktury.

Prokalitelnost - schopnost oceli dosáhnout tvrdosti do určité hloubky pod povrchem. Zjišťuje se Jominiho zkouškou - čelní zkouška prokalitelnosti.

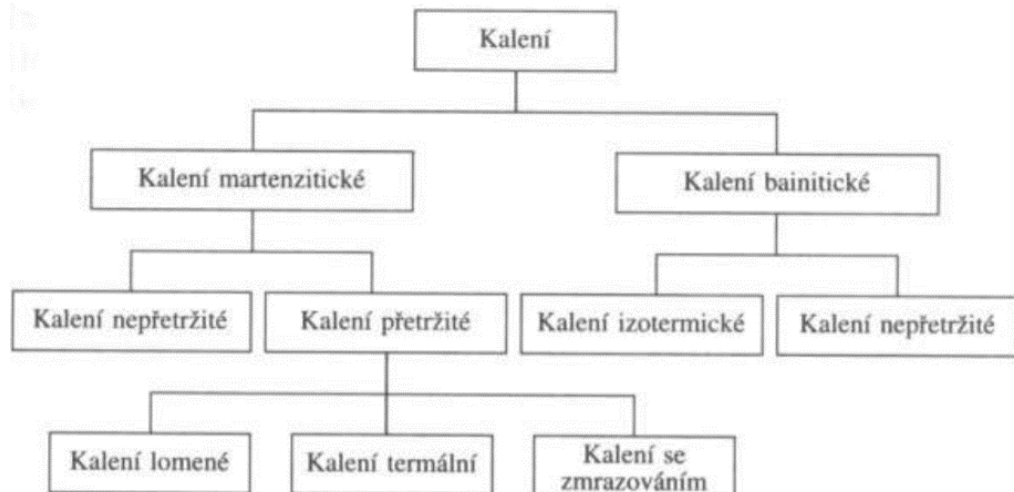
Zakalitelnost - spojena s tvrdostí oceli. Její maximální dosažitelná hodnota je určena tvrdostí martenzitu.

Uhlíkové oceli s přibývajícím legurami a větším množstvím uhlíku musí být pro dosažení vyšší tvrdosti pomaleji ochlazovány. Pro vysoce legované oceli je tento proces nejpomalejší. Při kalení potřebujeme ocel ochlazovat kritickou rychlostí. Pro dosažení teploty M_s a v závislosti na chemickém složení oceli se volí kalicí prostředí. [4]

1.3 Způsoby kalení

Podle požadovaných vlastností materiálu, který se má zakalit, je nutné zvolit vhodný způsob kalení. Kalením lze vytvořit dvě základní struktury- martenzitickou a bainitickou. Tyto dva

základní směry se následně dělí na další způsoby, které mohou ovlivňovat například vznik vnitřního pnutí, které může být nežádoucí. [6; 1]



Obrázek 7 Rozdělení druhů kalení [6]

1.3.1 Martenzitické kalení

Nepřetržité

Je to nejrozšířenější způsob, který spočívá v ohřevu na kalicí teplotu, výdrži (která je krátkodobá) a plynulém ochlazování ve vodě nebo v oleji. U kalených součástí s větším průměrem je z důvodu rychlého ochlazování větší teplotní rozdíl na povrchu a v jádře, což má za důsledek vznik vnitřního pnutí. [4; 5; 1]

Přetržité

Lomené – u tohoto typu se používají dvě kalicí prostředí. První kalicí prostředí je intenzivnější, aby vznikl martenzit, druhé prostředí je mírnější, abychom snížili vnitřní pnutí (např. voda + olej nebo olej + vzduch). Používá se u nízkolegovaných ocelí. [4; 5; 1]

Termální - kalícím prostředím je solná lázeň, která má teplotu cca o 30°C vyšší než je teplota počátku martenzitické přeměny. V lázni dochází k vyrovnání rychlosti ochlazování mezi povrchem a jádrem, poté dochází k vyjmutí předmětu z lázně a dochlazení na vzduchu. Takto lze kalit tvarově složité předměty z legovaných ocelí. [4; 5; 1]

Se zmrazováním – používá se pro nadeutektoidní oceli (valivá ložiska, měřidla, nástroje). Průběh je obdobný jako u předešlých způsobů s tím rozdílem, že se kalená součást po vyjmutí z kalícího prostředí vloží do zmrazovací lázně (dusík). Tento postup umožňuje, aby martenzitická přeměna proběhla až do konce, čímž lze ve finále výrazně eliminovat podíl zbytkového austenitu. Používá se u předmětů z oceli, které mají vysoké nároky na rozměrovou přesnost (měřidla). [4; 5; 1; 6]

1.3.2 Bainitické kalení

Jedná se o plynulé a pomalejší ochlazování než u martenzitického kalení. Austenit se rozpadá na bainit, případně bainit a martenzit. Bainitické kalení dále dělíme na [3; 1]:

Nepřetržitě – jedná se o obdobný způsob jako u předchozích metod, avšak po nepřetržitém bainitickém kalení následuje popouštění.

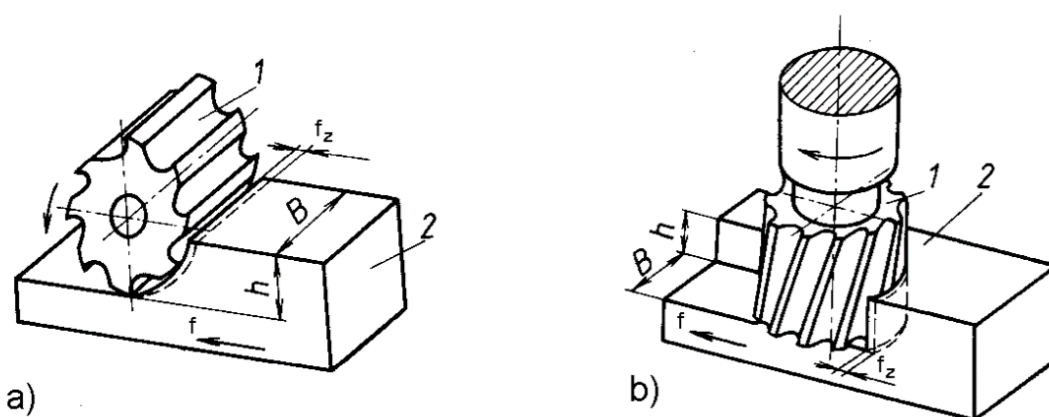
Izotermické – kalícím prostředím je solná lázeň. Po izotermickém kalení se nepopouští, protože bainit má nejenom dostatečnou pevnost a tvrdost, ale i houževnatost.

2 FRÉZOVÁNÍ

Jedná se o metodu třískového obrábění, při které se obrábí rovinné, nebo tvarové plochy. Samotný stroj pro frézování se nazývá frézka a nástroj fréza. Fréza je zpravidla vícebřítý nástroj, který má břity (zuby) buďto na obvodě nebo na obvodě a čele. Na klasických frézách se zpravidla obrábí rovinné plochy nebo tvarové přímkové plochy, avšak kopírovací frézky a CNC stroje umožňují frézovat i obecné tvarové plochy. Hlavní řezný pohyb (rotační) vykonává nástroj a obrobek koná pohyb posuvný. Posuv je obvykle přímočarý, otáčivý, nebo obecný pohyb po prostorové křivce. [7; 8; 9]

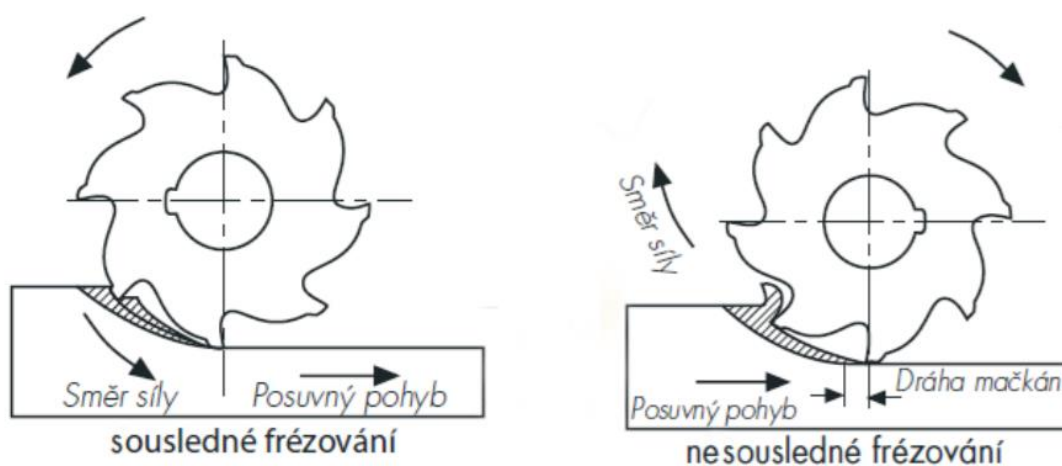
2.1 Základní pojmy frézování

Mezi základní způsoby patří frézování obvodem válcové frézy (fréza ubírá materiál zuby na obvodě) a frézování čelem čelní frézy (fréza ubírá materiál současně zuby na obvodě a na čele). Na obr. 8 je zobrazeno frézování obvodem válcové frézy a frézování čelem čelní frézy, kde: 1 - fréza, 2 - obrobek, h - hloubka úběru, B - šířka úběru, f - posuv, f_z - posuv na zub. [7; 8; 9]



Obrázek 8 a) frézování obvodem válcové frézy, b) frézování čelem čelní frézy [7]

Z hlediska smyslu otáčení nástroje vůči pohybu obrobku, lze frézování rozčlenit na sousledné a nesousledné. O sousledné frézování se jedná tehdy, když se fréza otáčí ve směru posuvu obrobku, naopak u nesousledného frézování se nástroj otáčí proti posuvu obrobku (viz obr. 9). Při válcovém sousledném frézování se tloušťka odřezávané třísky zmenšuje z maximální hodnoty po nulovou, zato při nesousledném frézování se zvětšuje z nulové po maximální hodnotu [8; 2; 9].



Obrázek 9 Frézování sousledné a nesousledné [10]

2.2 Řezné podmínky

Proces efektivního frézování probíhá pouze za předem daných řezných podmínek. Určení řezných podmínek je závislé na vlastnostech nástroje, stroje, obráběného materiálu, a požadovaných kritériích na dosaženou jakost obrobené plochy. Tyto hodnoty lze zjistit buďto ze strojírenských tabulek, nebo přímo od výrobce nástroje, který uvádí doporučené hodnoty. [2; 11; 9]

Řezná rychlost v_c

Jedná se o dráhu, kterou urazí hrana břitu každého zubu frézy v metrech za minutu. V dílenské praxi ji obvykle zjistíme z tabulek, ale můžeme ji vypočítat i podle následujícího vzorce, [10]:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (1)$$

Kde:

v_c [m.min⁻¹] - řezná rychlost,

D [mm] - řezný průměr frézy,

n [min⁻¹] - otáčky frézy.

Posuv na zub f_z

Jedná se o hodnotu, podle které vypočítáme dráhu posuvu stolu. Tato hodnota udává dráhu, kterou urazí obrobek za dobu záběru jednoho zubu frézy. Posuv na zub je popsán následujícím vztahem [10]:

$$f_z = \frac{v_f}{z \cdot n} \quad (2)$$

Kde:

f_z [mm] - posuv na zub,

v_f [m.min⁻¹] - posuvová rychlost,

z - počet zubů frézy,

n [min⁻¹] - otáčky frézy.

Posuv na otáčku f_n

Uvádí, jakou dráhu ujede nástroj za jednu celou otáčku. Posuv na otáčku je dán vztahem [10]:

$$f_n = f_z \cdot z \quad (3)$$

Kde:

f_n [mm] - posuv na otáčku,

f_z [mm] - posuv na zub,

z - počet zubů frézy.

Rychlost posuvu v_f

Rychlost posuvu označuje vzdálenost, kterou urazí obrobek vzhledem k nástroji za jednu minutu. Rychlost posuvu je popsána následujícím vztahem [10]:

$$v_f = f_n \cdot n \quad (4)$$

Kde:

v_f [m.min⁻¹] - posuvová rychlost,

n [mm^{-1}] - počet otáček frézy,

f_n [mm] - posuv na otáčku.

3 FRÉZOVACÍ NÁSTROJE

Frézy jako nástroje pro frézování se podle jejich technologických parametrů dělí do několika kategorií. Dle základních parametrů lze frézy rozdělit podle tvaru frézy, umístění břitů, konstrukce, upnutí a průběhu ostří. [12; 13; 9]

3.1 Umístění břitů

Dle umístění břitů se frézy dělí na [13]:

Válcové frézy – břity na válcové ploše frézy.

Čelní frézy – břity umístěné na válcové ploše frézy.

Kotoučové frézy – břity na válcové ploše a obou čelních plochách frézy.

Kuželové frézy – břity na jedné nebo dvou kuželových plochách frézy.

Tvarové frézy – břity umístěné na tvarových plochách frézy.

3.2 Průběh ostří zubů

Dle průběhu ostří zubů se frézy dělí na [13]:

Frézy s přímými zuby – zuby frézy jsou umístěny rovnoběžně s osou nástroje.

Frézy se zuby ve šroubovici – zuby nástroje jsou umístěny na pravotočivé nebo levotočivé šroubovici.

Frézy s přímými zuby zabírají najednou, což může způsobovat vibrace, zmenšuje se přesnost a povrchová kvalita obrobku. Šikmě usazené zuby vcházejí do materiálu postupně, čímž se vibrace mírní. Dokončovací frézy mají v praxi větší úhly šroubovice pro dosažení lepšího povrchu obrobku. [11]

3.3 Rozteč zubů

Počet zubů nástroje bývá zvolen s ohledem na dosažení maximálního úběru co největší. Při volbě počtu zubů frézy jsou rozhodujícími faktory obráběný materiál, šířka součásti, stabilita, výkon stroje a požadavky na kvalitu povrchu.

Velmi účinným způsobem jak omezit tendenci k vibracím při frézování je použití nerovnoměrného dělení zubů frézy. Vibrace vzniklé obráběním mohou mít negativní vliv na opotřebení nástroje, ale i na povrch obrobku. [11; 13]

3.4 Upínání frézy

Dle způsobu upnutí dělíme frézy na:

Nástrčné – upínají se za upínací otvor s drážkou pro pero, které přenáší kroutící moment.

Stopkové – upínají se za válcovou stopku, kuželovou stopku ISO, nebo Morse kužel.

Zvolení vhodného upnutí nástroje musí zajistit maximální tuhost, nízké hodnoty radiálního házení a zamezení případnému protočení nástroje v upínači. Radiální házení by se mělo s ohledem na délku frézy pohybovat v hodnotách do jedné až dvou setin milimetru. Problematika radiálního házení spočívá v nerovnoměrném zatížení jednotlivých břitů, což může při frézování přesných rozměrů způsobit problémy s dodržáním rozměru a drsnosti. To se projevuje na trvanlivosti ostří a v některých případech vede k lomu nástroje. Například u frézy o průměru 8mm a házivosti 0,04mm klesá trvanlivost ostří na 25%.

Mezi nejběžnější upínače stopkových fréz patří [12; 13]:

WELDON - jedná se o upínač s válcovou stopkou s ploškou pro upínací šroub kolmo k ose vřetena, který zamezuje přetočení nástroje v upínači.

Kleštinový upínač - upínací pouzdro s dutinou typu ER, upínání válcové stopky upínací maticí do kleštin.

Hydraulický upínač - pomocí hydraulického oleje je pouzdro stlačováno, dochází k mírné deformaci a tím dojde k obepnutí stopky nástroje a upnutí do upínače.

Tepelný upínač - upnutí frézy je důsledkem smrštění materiálu.

3.5 Konstrukce nástroje

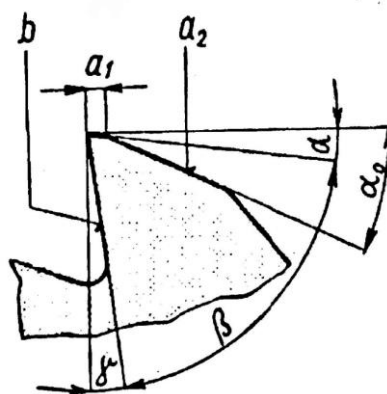
Dle konstrukce frézy dělíme na [13]:

Monolitní – fréza je z jednoho celistvého kusu materiálu, nejčastěji odlévané z rychlořezné oceli, nebo se jedná o menší frézy ze slinutého karbidu.

Frézy s výměnnými břitovými destičkami – mají mechanicky upínané vyměnitelné břitové destičky z různých řezných materiálů.

3.6 Geometrie břitu frézy

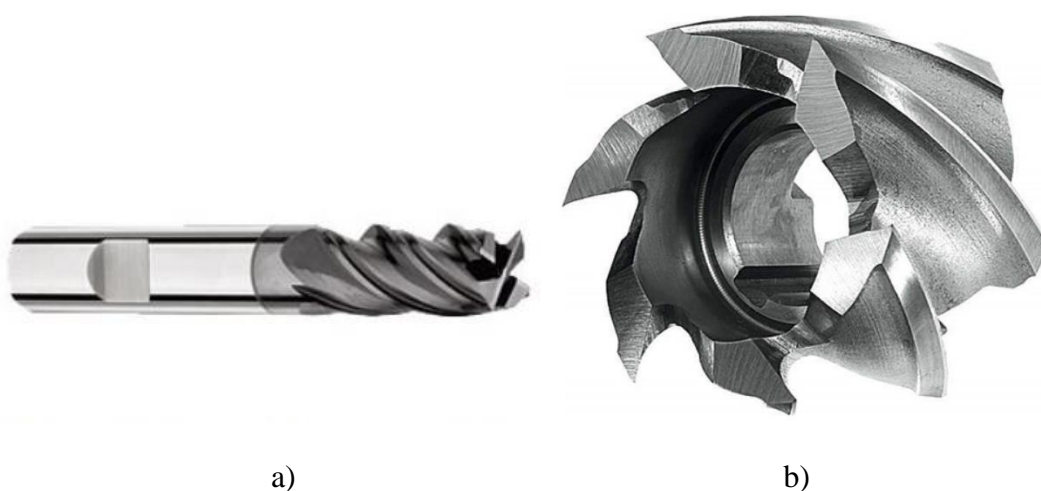
Pro optimální úběr třísky jsou klíčové nástrojové úhly. Klínovité provedení zakončení břitu je tvořeno dvěma plochami (čelo zubové drážky a hřbet), v jejich průsečíku pak vzniká ostří. Na obrázku 10 je vyobrazen profil břitu frézy kde: b – čelo zubové drážky, γ – úhel čela, $a_{1,2}$ – hřbet (první a druhá fazeta), α – úhel hřbetu, β – úhel řezného klínu. Vzájemná poloha ploch břitu nástroje a obrobku vytváří soustavu úhlů, která se popisuje jako nástrojová geometrie. Hodnoty jednotlivých úhlů jsou závislé na druhu obráběného materiálu a u normalizovaných fréz mají stanovenou hodnotu. [7; 14]



Obrázek 10 Úhly v profilu břitu frézy [14]

3.7 Materiál nástroje

Nejpoužívanějšími materiály pro výrobu fréz jsou slinutý karbid a rychlořezná ocel (označení HSS nebo RO).



Obrázek 11 a) Monolitní fréza ze slinutého karbidu

b) Nástrčná fréza z rychlořezné oceli [15; 16]

3.7.1 Slinutý karbid

Slinuté karbidy (neboli tvrdokovy) jsou vyráběny práškovou metalurgií. Jedná se o kompozitní materiál, který tvoří tvrdý materiál (karbid wolframu, karbid tantalu nebo karbid titanu) a relativně měkké kovové pojivo, jako je například kobalt. Dosažení optimálních vlastností je závislé na podílu kobaltu, a na velikosti zrna tvrdé složky. Mezi charakteristické rysy tvrdokovů patří tvrdost, pevnost v ohybu a lomová houževnatost. K dosažení maximální otěruodolnosti, musí obsahovat pár procent podílu kobaltu a velikost zrn se musí pohybovat v nanokrystalické oblasti ($<0,2 \mu\text{m}$). Tyto vlastnosti jsou primární pro výrobu fréz určených k obrábění kaleného materiálu. Monolitní frézy, nebo vyměnitelné plátky ze slinutého karbidu zanechávají lepší povrch, vydrží vyšší teploty a dovolují rychlejší řezné podmínky než nástroje z rychlořezné oceli. [17; 18]



Obrázek 12 Struktura tvrdokovu [18]

3.7.2 Rychlořezná ocel

Jedná se o vysoce legovaný materiál. Mezi legury řadíme wolfram, molybden, chrom, vanad a kobalt. Rychlořezná ocel se používá zejména na netvrzené oceli a jiné měkké kovy, na kalené materiály tudíž není vhodná. V porovnání s tvrdokovem je její nevýhodou nízká životnost a rychlé opotřebení. [17]

3.8 Povlakování

Nedílnou součástí nástrojů, které jsou určeny pro obrábění nejenom kaleného materiálu, je povlakování. Povlak je velice tenká vrstva materiálu (v řádu μm) se specifickými vlastnostmi nanesená na nástroj za účelem zvýšení životnosti. Povlakované nástroje mají složenou materiálovou strukturu, skládající se z podkladu pokrytého tvrdou, otěruodolnou, chemicky inertní a tepelně izolační vrstvou. Nástroje s povlakem ve srovnání s nástroji bez povlaku, nabízí lepší ochranu proti mechanickému a tepelnému zatížení, menší tření a vzájemné působení mezi nástrojem a třískou, a také zlepši odolnost proti opotřebení v širokém rozsahu řezných teplot. Zvýšený řezný výkon povlakovaných nástrojů můžeme vysvětlit mechanickou a tepelnou zátěží na řeznou hranu nástroje při úběru materiálu. [19]



Obrázek 13 Nanesený povlak [20]

3.8.1 Základní metody povlakování

Povlakování lze provést čtyřmi základními metodami – Metodou PVD (fyzikální napařování), metodou CVD (chemické napařování z plynné fáze), metodou PCVD (plasmaticky aktivované CVD metody) a metodou MTCVD (CVD ze středních teplot).

Metoda PVD – Jedná se o nejvyžívanější metodu, je charakteristická nízkou pracovní teplotou, která je pod 500°C, proto je vhodná i pro povlakování nástrojů z rychlořezné oceli – nedojde k tepelnému ovlivnění nástroje. Povlak je nejčastěji vytvářen napařováním (materiál povlaku je odpařován), naprašováním (jedná se o fyzikální odprašovací proces), či iontovou implantací (hybridní PVD proces povlakování, kde je povrch substrátu bombardován svazkem částic s vysokou energií).

Metoda CVD – Jedná se o metodu která je využívána převážně na povlakování slinutých karbidů, probíhá za vysokých teplot v rozmezí 1000- 1200°C. Povlak je nejčastěji vytvářen tepelným indukovaním, plazmatickým aktivováním, elektronovým či fotonovým indukovaním.

Metoda PCVD a MTCVD – od klasické CVD metody se liší nižšími pracovními teplotami PCVD 400- 600°C a MTCVD 700- 850°C. Nemění však její princip – vytváření povlaku z plynné fáze. [19; 13; 20]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Hlavním cílem této bakalářské práce je ověřit vhodnost navržených nástrojových geometrií pro obrábění kaleného materiálu a následně vyhodnotit závislost navržených parametrů na efektivitu obrábění. Samotné vyhodnocení provedených experimentů bude provedeno na základě výsledků dosažené drsnosti povrchu obrobku frézovaného navrženými nástroji.

Díličními cíli této bakalářské práce jsou:

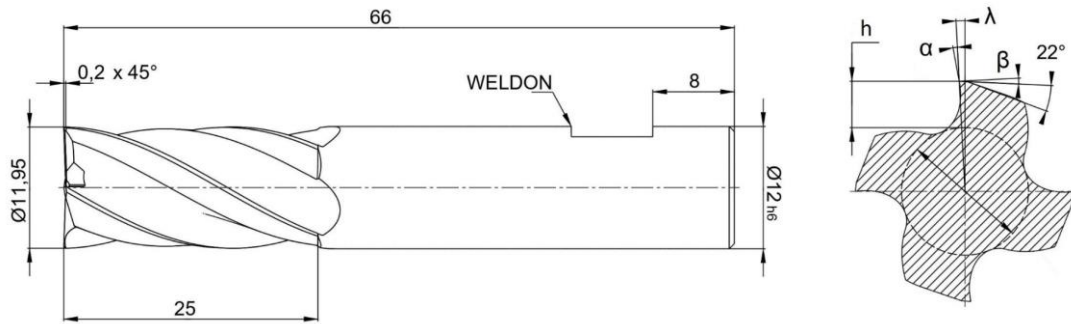
- návrh deseti fréz s odlišnou nástrojovou geometrií,
- výroba a zaměření nástrojů,
- otestování nástrojů v provozu,
- hodnocení účinnosti,
- hodnocení drsnosti povrchu,
- vyhodnocení naměřených výsledků.

5 NÁVRH GEOMETRIE NÁSTROJŮ

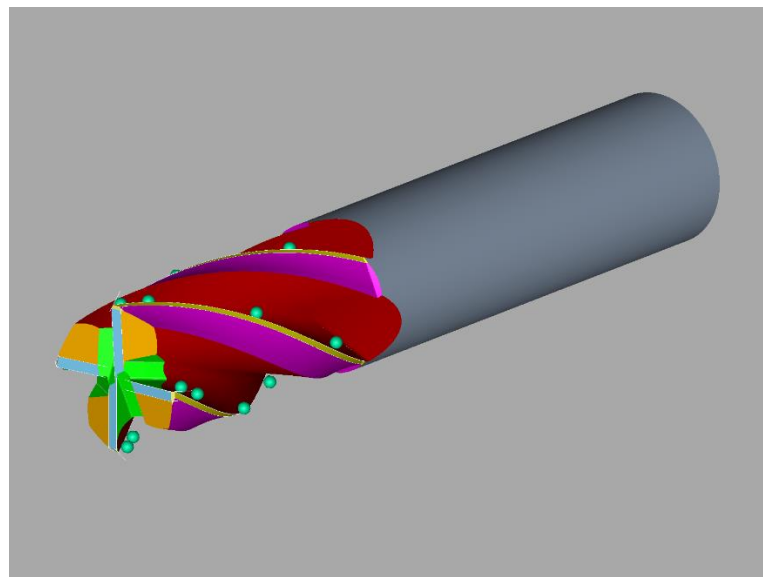
K provedení experimentu bylo navrženo deset monolitních čtyřzubých fréz o průměru dvanáct milimetrů ze slinutého karbidu. Hlavní parametry, udávající řezivost nástroje jsou úhly, které tvoří řezný klín na zubu frézy. Jedná se o úhel čela v zubové drážce (α) a úhel hřbetu zubu (β). Další proměnné byly úhel šroubovice zubu frézy (γ), nerovnoměrné dělení zubů (λ) a hloubka drážky (h). Zvolené parametry jsou uvedeny v tabulce 1. Úhly řezného klínu (úhly α a β) byly náhodně vybrány, aby pokryly škálu úhlů vyráběných nástrojů firmou JK Nástroje s.r.o.. Pro úhel šroubovice a hloubka drážky, byly navrženy dvě možnosti podle běžných fréz na trhu a náhodně přiřazeny k nástrojům. Dělení břitů se volilo buď jako rovnoměrné (NE/0°), to znamená u čtyřzubé frézy dělení na 0°/90°/180°/270°, nebo nerovnoměrné (ANO/5°), to vychází na 5°/90°/185°/270° (první a třetí břit pootočený o 5°). Za účelem zkrácení obráběcího času bylo rozhodnuto frézy nepovlakovat čímž se zkrátila jejich životnost, ale neovlivnilo to jejich řezivost a tím pádem ani schopnost obrábět kalené materiály.

Tabulka 1 Navržené nástroje

Číslo frézy	Úhel čela v zubové drážce (α)	Úhel hřbetu (β)	Úhel šroubovice (γ)	Nerovnoměrné dělení břitů(λ)	Hloubka drážky (h)[mm]
1.	5°	8°	30°	ANO / 5°	2,5
2.	8°	5°	30°	NE / 0°	2,5
3.	5°	10°	30°	NE / 0°	2
4.	4°	8°	43°	ANO / 5°	2,5
5.	2°	6°	30°	NE / 0°	2
6.	4°	2°	43°	ANO / 5°	2,5
7.	7°	2°	30°	ANO / 5°	2
8.	2°	2°	43°	NE / 0°	2,5
9.	2°	10°	30°	ANO / 5°	2
10.	6°	2°	30°	NE / 0°	2



Obrázek 14 Schéma frézy



Obrázek 15 Grafický návrh frézy

6 VÝROBA A KONTROLA NAVRŽENÝCH NÁSTROJŮ

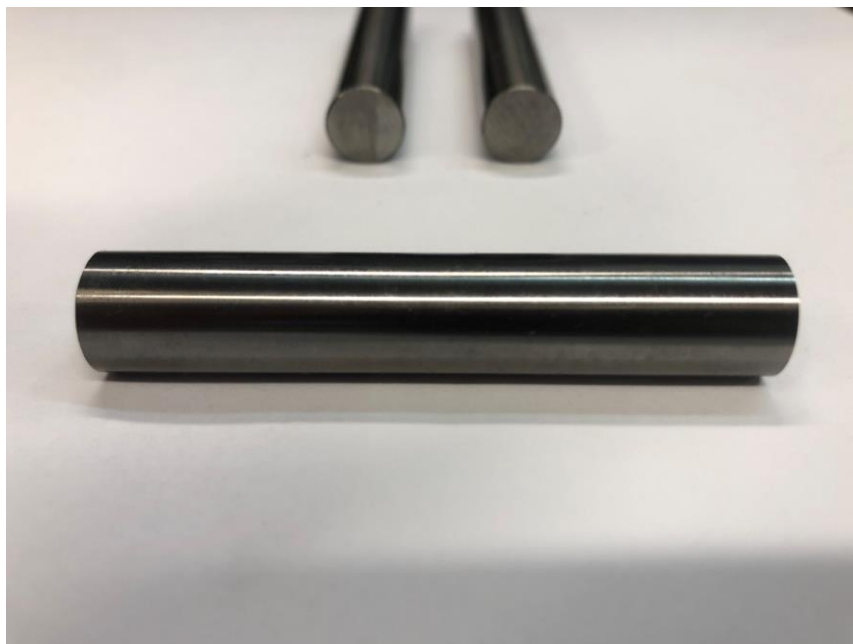
V první fázi byly nařezány roubíky na požadovanou délku. Frézy byly vyhotoveny na pětiosé CNC brusce HELITRONIC BASIC a zaměřeny pomocí měřicího přístroje HELICHECK BASIC 3 a posuvného měřidla.

6.1 Příprava polotovaru

Polotovary pro výrobu fréz neboli roubíky, byly nařezány na automatické řezačce TM 374 firmy WIMMER. Tento stroj má automatickou brousící osu pro odřezávání obrobků až do průměru 50 mm s vysokou přesností.



Obrázek 16 Řezačka TM 374



Obrázek 17 Polotovar frézy

6.2 Výroba nástrojů

Nástrojová CNC bruska HELITRONIC BASIC s pěti osami je specializovaným strojem pro ostření a výrobu rotačně symetrických nástrojů. Tento stroj používá software HELITRONIC TOOL STUDIO, pomocí kterého byl vytvořen program na výrobu fréz. Je to software CAD/CAM, který umožňuje zpracovat všechny parametry nástroje od konstrukce až po výrobu.



Obrázek 18 Stroj *HELITRONIC BASIC*

Tabulka 2 Parametry stroje *HELITRONIC BASIC*

Max. průměr brusného kotouče	150 mm
Otáčky brusného kotouče	0-10500 ot/min
Min. průměr nástroje	3 mm
Max. průměr nástroje	320 mm
Max. délka nástroje	350 mm



Obrázek 19 Polotovár v kleštinovém upínací s prodloužením

Jelikož část frézy určená pro upnutí byla relativně krátká, bylo nutné použít prodloužení, aby se zamezilo kolizi stroje.



Obrázek 20 Průběh výroby frézy

K výrobě fréz byly použity superabrazivní diamantové brusné kotouče. Pomocí těchto kotoučů lze brousit a vyrábět všechny řezné nástroje ze slinutého karbidu určené pro dřevozpracující a kovodělný průmysl.

Jako první proběhlo vybroušení zubové drážky, poté obvodu frézy a na konec bylo nabroušeno čelo frézy. Řezné rychlosti při výrobě se pohybovaly v rozmezí $v_c = 18 - 26$ m/s. a všechny operace probíhaly za stálého přívodu oleje jakožto chladicí kapaliny. Po vyhotovení fréz se na univerzální nástrojové brusce vybrousily upínací plošky pro upínač typu WELDON.



Obrázek 21 Vyrobená fréza

6.3 Kontrola vyrobených nástrojů

Přesné zaměření nástrojů bylo provedeno na stroji HELICHECK BASIC 3. Jedná se o optický CNC měřicí stroj firmy WALTER, který disponuje precizní měřicí technologií pro bezkontaktní zaměřování rotačně symetrických nástrojů, brusných kotoučů a výrobních dílů.



Obrázek 22 CNC měřicí stroj HELICHECK BASIC 3 [21]

6.3.1 Naměřené hodnoty

V tabulkách níže jsou uvedeny nominální hodnoty fréz, které byly stanoveny pro účel experimentu a skutečné naměřené hodnoty, které byly zjištěny pomocí měřicího stroje a posuvného měřidla. Na stroji HELICHECK BASIC 3 byl měřen úhel čela zubové drážky, úhel hřbetu a úhel šroubovice. Úhel čela zubové drážky byl měřen v hloubce 0,4 mm. Měření hloubky zubové drážky bylo provedeno ručně pomocí posuvného měřidla.

Tabulka 3 Fréza č. 1

<i>Parametry FRÉZA č. 1</i>	<i>Naměřená hodnota</i>	<i>Nominální hodnota</i>
Úhel čela zubové drážky α	4.91°	5°
Úhel hřbetu první fazetky β	7.88°	8°
Úhel šroubovice γ	29.65°	30°
Hloubka drážky	2,5 mm	2,5 mm

Tabulka 4 Fréza č. 2

<i>Parametry FRÉZA č. 2</i>	<i>Naměřená hodnota</i>	<i>Nominální hodnota</i>
-----------------------------	-------------------------	--------------------------

Úhel čela zubové drážky α	8.33°	8°
Úhel hřbetu první fazetky β	5.46°	5°
Úhel šroubovice γ	29.93°	30°
Hloubka drážky	2,5 mm	2,5 mm

Tabulka 5 Fréza č. 3

<i>Parametry FRÉZA č. 3</i>	<i>Naměřená hodnota</i>	<i>Nominální hodnota</i>
Úhel čela zubové drážky α	5.29°	5°
Úhel hřbetu první fazetky β	9.77°	10°
Úhel šroubovice γ	32.96°	30°
Hloubka drážky	2 mm	2 mm

Tabulka 6 Fréza č. 4

<i>Parametry FRÉZA č. 4</i>	<i>Naměřená hodnota</i>	<i>Nominální hodnota</i>
Úhel čela zubové drážky α	4.22°	4°
Úhel hřbetu první fazetky β	7.9°	8°
Úhel šroubovice γ	42.49°	43°
Hloubka drážky	2,5 mm	2,5 mm

Tabulka 7 Fréza č. 5

<i>Parametry FRÉZA č. 5</i>	<i>Naměřená hodnota</i>	<i>Nominální hodnota</i>
Úhel čela zubové drážky α	1.88°	2°
Úhel hřbetu první fazetky β	6.25°	6°
Úhel šroubovice γ	30°	30°
Hloubka drážky	2 mm	2 mm

Tabulka 8 Fréza č. 6

<i>Parametry FRÉZA č. 6</i>	<i>Naměřená hodnota</i>	<i>Nominální hodnota</i>
Úhel čela zubové drážky α	3.58°	4°
Úhel hřbetu první fazetky β	2.46°	2°
Úhel šroubovice γ	42.69°	43°
Hloubka drážky	2,5 mm	2,5 mm

Tabulka 9 Fréza č. 7

<i>Parametry FRÉZA č. 7</i>	<i>Naměřená hodnota</i>	<i>Nominální hodnota</i>
Úhel čela zubové drážky α	6.78°	7°
Úhel hřbetu první fazetky β	2.5°	2°
Úhel šroubovice γ	32.98°	30°
Hloubka drážky	2 mm	2 mm

Tabulka 10 Fréza č. 8

<i>Parametry FRÉZA č. 8</i>	<i>Naměřená hodnota</i>	<i>Nominální hodnota</i>
Úhel čela zubové drážky α	1.67°	2°
Úhel hřbetu první fazetky β	1.78°	2°
Úhel šroubovice γ	39.82°	43°
Hloubka drážky	2,5 mm	2,5 mm

Tabulka 11 Fréza č. 9

<i>Parametry FRÉZA č. 9</i>	<i>Naměřená hodnota</i>	<i>Nominální hodnota</i>
Úhel čela zubové drážky α	1.7°	2°
Úhel hřbetu první fazetky β	9.64°	10°
Úhel šroubovice γ	32.96°	30°
Hloubka drážky	2 mm	2 mm

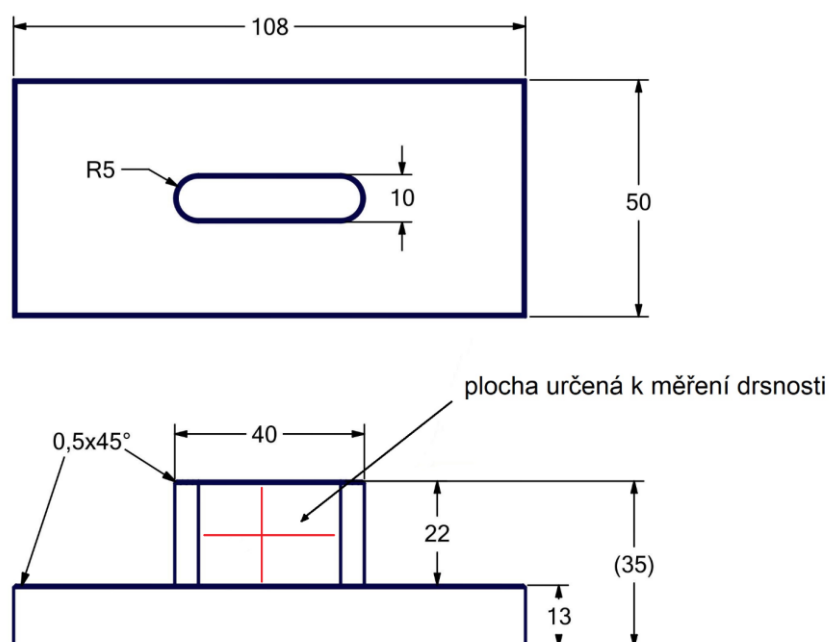
Tabulka 12 Fréza č. 10

<i>Parametry FRÉZA č. 10</i>	<i>Naměřená hodnota</i>	<i>Nominální hodnota</i>
Úhel čela zubové drážky α	5.75°	6°
Úhel hřbetu první fazetky β	2.5°	2°
Úhel šroubovice γ	29.94°	30°
Hloubka drážky	2 mm	2 mm

Naměřené hodnoty se pohybují v dovolené toleranci 0.5°, pokud by byla tato tolerance překročena, bylo by nutné nástroj přeastřit. Tato tolerance byla zvolena z důvodu malé série s měnicími se parametry, u velkosériové výroby lze tuto chybu výrazně zredukovat.

7 TESTOVÁNÍ NAVRŽENÝCH NÁSTROJŮ

Pro otestování fréz byla zvolena metoda sousledného čelního frézování. Z ocelového polotovaru o rozměrech 108x50x35 mm se frézoval materiál směrem od obvodu ke středu, kde zůstal tvar s plochou určenou k měření drsnosti. Na obrázku 23 je vyobrazeno schéma obrobku, na kterém se posléze měřila drsnost povrchu.



Obrázek 23 Schéma obrobku

7.1 Obráběný materiál

Pro testování navržených nástrojů byl jako obráběný materiál zvolena nízkolegovaná ocel k zušlechťování 42CrMo4, která byla zakalená na tvrdost 48-49 HRC. V tabulce níže je uvedeno chemické složení obráběné oceli. Na obrázku 24 je zobrazen polotovar obrobku, u kterého je charakteristická modrá barva, kterou materiál získal zakalením.

Tabulka 13 Chemické vlastnosti oceli 42CrMo4

	C(%)	Si(%)	P(%)	S(%)	Mn(%)	Cr(%)	Ni(%)	V(%)	Mo(%)	Al(%)
%	0,420	0,190	0,018	0,027	0,800	0,970	0,180	0,010	0,150	0,019



Obrázek 24 Zakalený polotovar



Obrázek 25 Stopy po provedené zkoušce tvrdosti

7.2 Stroj

Test obrábění proběhl na vertikálním obráběcím centru MCV 754 QUICK. Je to vysoce produktivní stroj pro komplexní třískové obrábění. Jeho výkon vřetena je 9 kW a otáčky vřetena dosahují až $10\,000\text{ min}^{-1}$. Tento stroj je ovládán řídicím systémem HEIDENHAIN iTNC530 HSCI.



Obrázek 26 Obráběcí centrum MCV 754 QUICK

Kvůli zajištění proti pootočení a tuhosti upnutí frézy, byl zvolen upínač typu WELDON s chladícím kanálkem. Délka vystrčení frézy činila 29mm. Obráběný polotovár byl upnut do strojního svěráku.



Obrázek 27 Upnutá fréza ve stroji



Obrázek 28 Obrobek ve strojním svěráku

7.3 Řezné podmínky

Na základě sledovaných parametrů byly zvoleny řezné podmínky, které měly otestovat řezivost fréz. Tyto řezné podmínky se v provozu volí k hrubovacím operacím. Frézy obráběly do hloubky 22 mm na jeden úběr. Za jeden testovací cyklus byly obrobena dva polotovary, obráběcí čas tohoto cyklu činil 25 min. Během celé operace frézování, byla použita chladicí emulze.

Tabulka 14 Řezné rychlosti při obrábění

v_c	190 (m.min ⁻¹)
f_z	0,125 (mm)
f_n	0,36 (mm)
n	5000 (min ⁻¹)
v_f	2250 (m.min ⁻¹)



Obrázek 29 Průběh frézování

7.4 VYHODNOCOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

V první řadě se hodnotila účinnost frézy během obrábění. Pokud během frézování došlo ke zlomení frézy nebo zatížení vřetena stroje přesáhlo 60%, test byl zastaven a fréza vyhodnocena jako nevyhovující. Pro dokončení testu bylo vyžadováno, aby fréza obráběla za daných rezných podmínek po dobu 25min, to vycházelo na obrobení dvou bloků zakalené oceli. Pokud nástroj prošel testem (tzn., že obrobil oba polotovary bez zalomení nebo překročení limitu zatížení vřetene), provedlo se měření drsnosti povrchu na ploše obrobku. Měření proběhlo na měřícím stroji SURFCOM NEX 001. Měřila se střední aritmetická úchylka povrchu (R_a) a výška nerovnosti profilu (R_z). Pro dosažení přesnějšího výsledku, bylo měření provedeno nejprve ve vertikálním a následně horizontálním směru, jak je zaznačeno červenou čarou na **obrázku 23**. V poslední řadě se opticky hodnotil stav fréz po provedení experimentu.

Během obrábění frézou č. 2, došlo po třech minutách k zalomení nástroje, byla tedy vyhodnocena jako nevyhovující. Podobný průběh byl i u frézy č. 10, u které došlo k lomu po šesti minutách. Fréza č. 7 překračovala limit zatížení vřetena a z tohoto důvodu byl test nástroje předčasně ukončen a vyhodnocen jako nevyhovující.



Obrázek 30 Zlomená fréza č. 2

Průběhem obráběcího cyklu byla sledována a zapisována hodnota zatížení vřetena stroje. Přestože byl pro jednotlivé nástroje obráběcí cyklus prováděn za stejných podmínek, docházelo u některých nástrojů k většímu zatížení vřetene, což způsobovalo vyšší vibrace a hlučnost stroje. K překročení limitu došlo u frézy č. 7, která překročila limit o 10%.

Tabulka 15 Tabulka zatížení vřetena

Číslo frézy	Zatížení vřetena (%)
1	18-25
2	
3	18-25
4	18-25
5	35-40
6	35-40
7	70
8	27-35
9	20-28
10	

V tabulkách 15 a 16 jsou vepsány naměřené výsledky měření drsnosti povrchu obrobku, vyšší hodnota ze dvou měření byla označena zeleně pro přehlednost a byla stanovena jako výsledná hodnota měření. Na vzorcích, které nebyly dokončeny během testu, se měření drsnosti neprovádělo.

Tabulka 16 Tabulka naměřené stření aritmetické úchytky

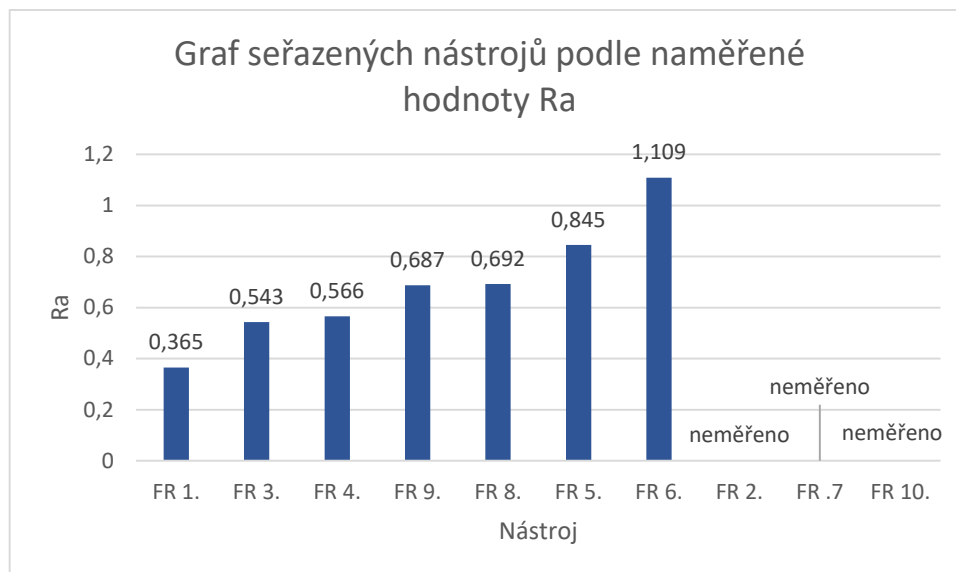
Číslo frézy	Ra horizontální	Ra vertikální
1	0,365	0,322
2	<i>neměřeno</i>	<i>neměřeno</i>
3	0,397	0,543
4	0,47	0,566
5	0,763	0,845
6	1,064	1,109
7	<i>neměřeno</i>	<i>neměřeno</i>
8	0,692	0,596
9	0,687	0,553
10	<i>neměřeno</i>	<i>neměřeno</i>

Tabulka 17 Tabulka naměřené výšky nerovnosti profilu

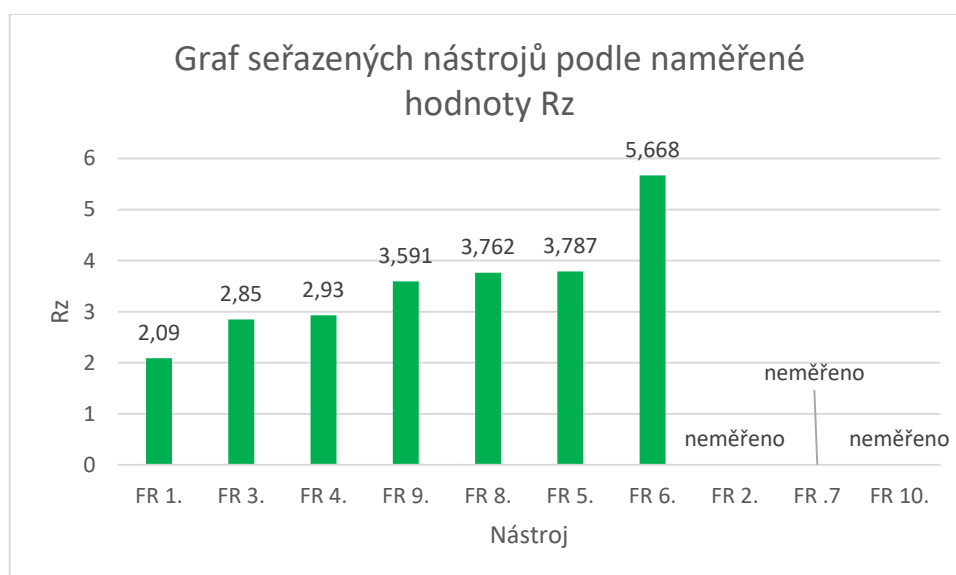
Číslo frézy	Rz horizontální	Rz vertikální
1	2,09	1,6
2	<i>neměřeno</i>	<i>neměřeno</i>
3	2,85	1,97
4	2,82	2,93
5	3,193	3,787
6	4,587	5,668
7	<i>neměřeno</i>	<i>neměřeno</i>
8	3,002	3,762
9	2,958	3,591
10	<i>neměřeno</i>	<i>neměřeno</i>

Z obou tabulek vychází, že ze všech nástrojů, které dokončily obráběcí cyklus, dosáhla nejlepších výsledku fréza č. 1 a naopak jako nejhorší se ukázala fréza č.6.

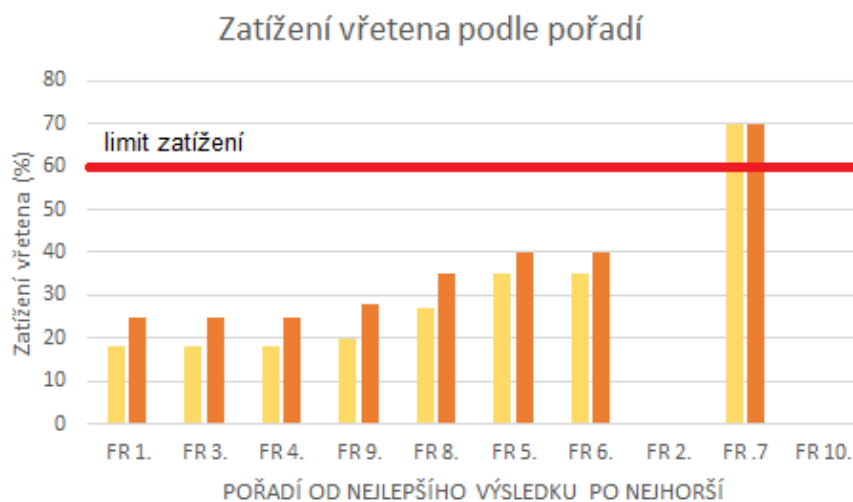
Frézy číslo 1, 3, 4, 5, 6, 8 a 9 dokončily test a po vyhodnocení drsnosti povrchu byly seřazeny od nejlepšího výsledku po nejhorší (viz obr. 31 a 32). Tento výsledek potvrzuje i tendence grafu na obrázku, který znázorňuje závislost pořadí fréz a zatížení vřetene.



Obrázek 31 Vyhodnocení hodnoty Ra

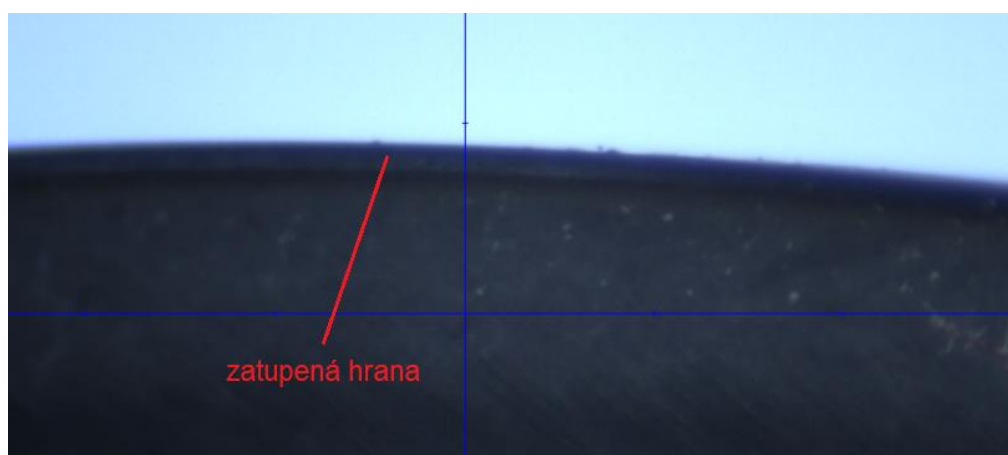


Obrázek 32 Vyhodnocení hodnoty Rz



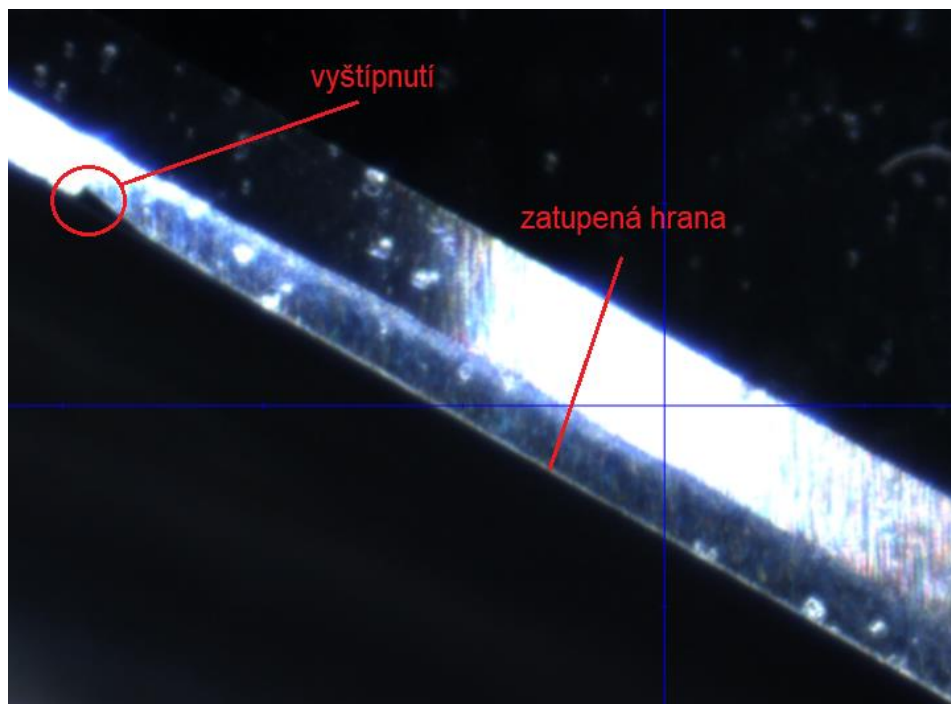
Obrázek 33 Graf znázorňující rostoucí tendenci zatížení vřetene

Nejlepší nástrojem podle naměřené drsnosti povrchu obrobku byla vyhodnocena fréza č. 1. Tato fréza dosáhla nejlepšího výsledku drsnosti povrchu a v porovnání s frézou č. 6, nesla minimální známky opotřebení.



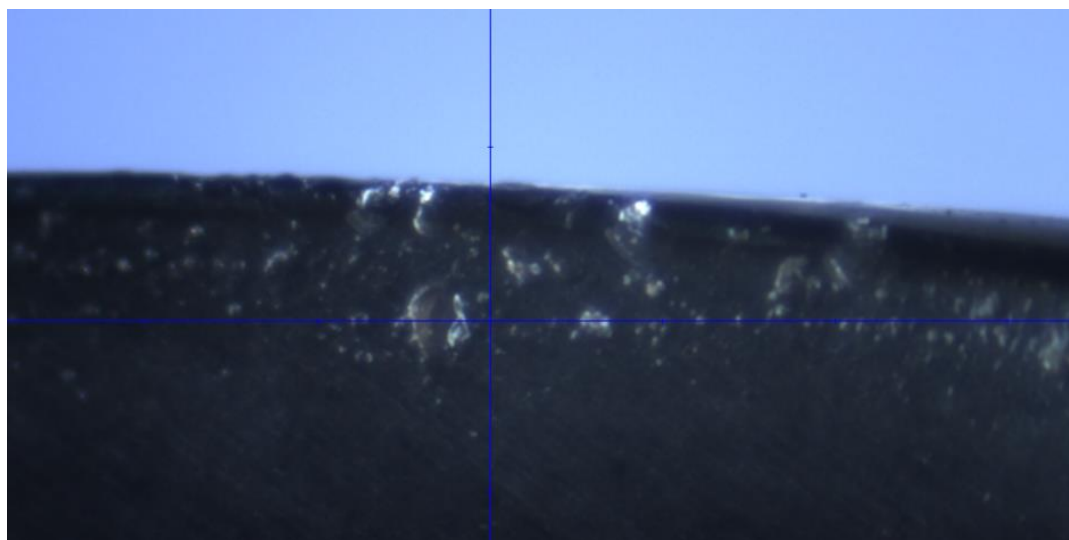
Obrázek 34 Zatupená hrana frézy č.1

Na nástroji bylo možné vidět stopu po obrábění ve formě zatupené hrany. Na několika místech došlo i k vyštípnutí materiálu.

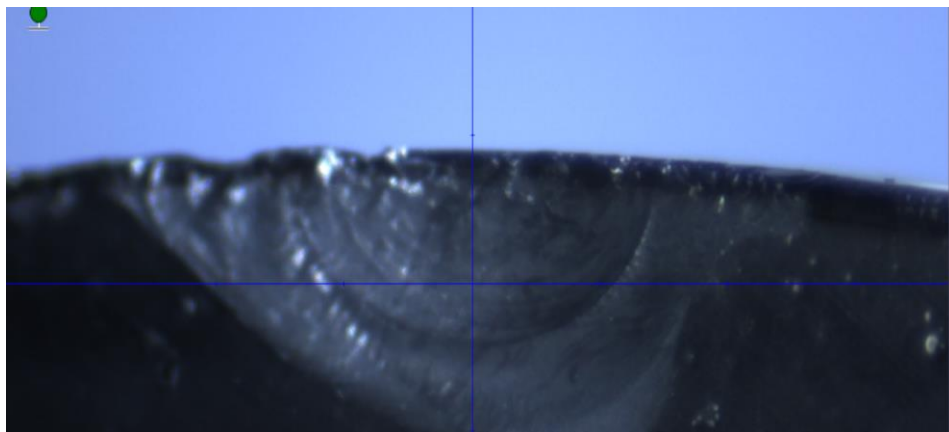


Obrázek 35 Zatupená hrana a místní vyštipnutí frézy č. 1

Čím větší byla naměřená drsnost povrchu, tím větší bylo i opotřebení fréz. Na nástrojích č. 8 a 9 byly zaregistrovány mikrotrhliny a četnější defekty než na nástrojích č. 3, 4 a 1.

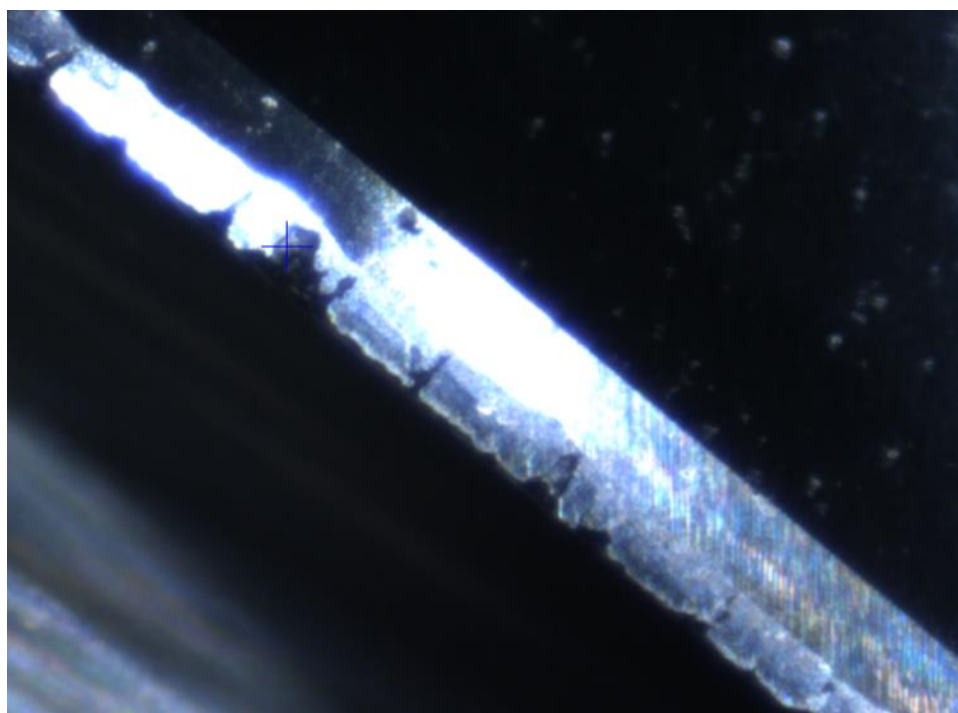


Obrázek 36 Zatupená hrana, četná vyštipnutí a mikrotrhliny (fréza č. 8)



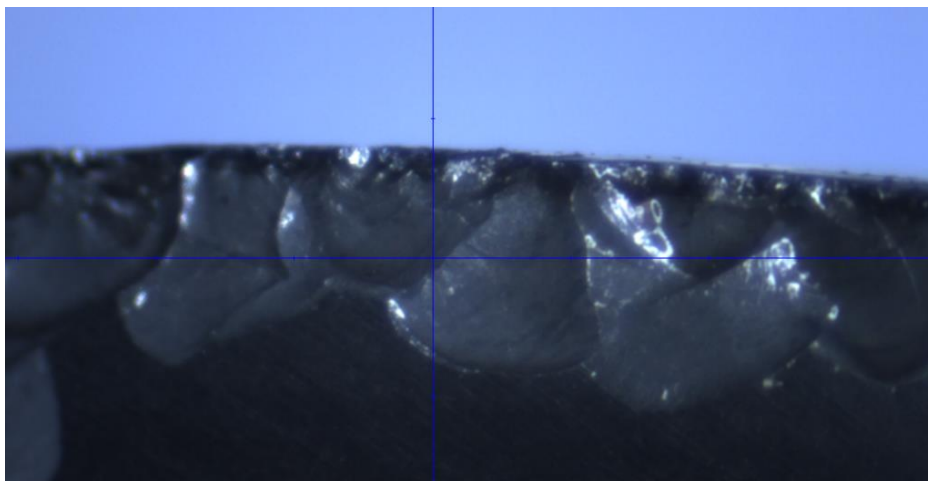
Obrázek 37 Velké vyštípnutí na břitu (fréza č. 6)

Na frézách č. 5 a 6 došlo na všech břitech k deformacím v podobě velkých vyštípnutí. Během frézování však nebyly postřehnuty zásadní tendence k zvyšování zátěže na vřetenu, které by neumožnilo dokončit cyklus.



Obrázek 38 Detail zdeformovaného hřbetu frézy č. 6

Na obrázku č. 39, je fotografie břitu frézy č. 7. Podle stavu této frézy lze na první pohled říci, že zvolená nástrojová geometrie nebyla vhodná pro obrábění kaleného materiálu.

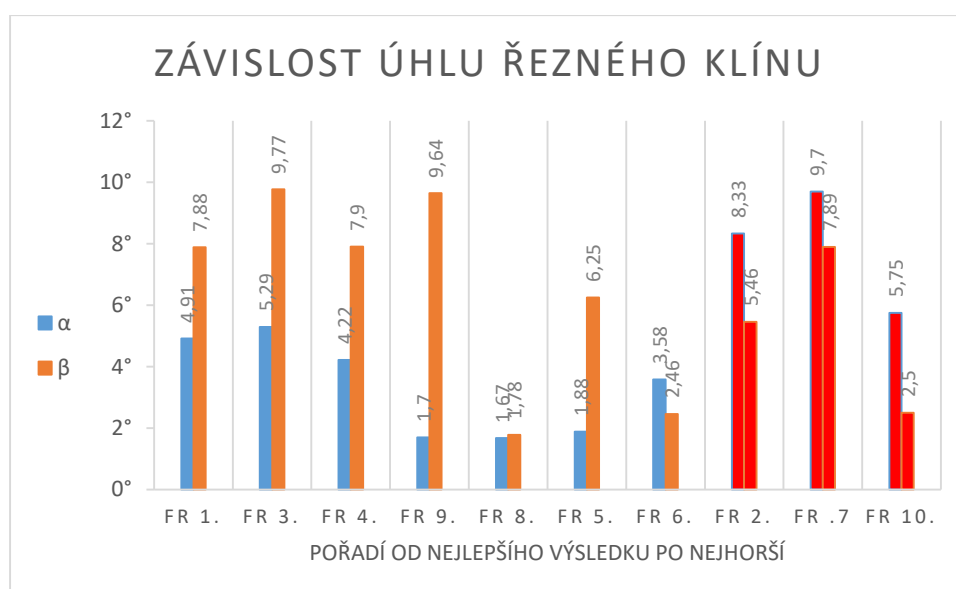


Obrázek 39 Vyštípaný břit frézy č. 7

8 DISKUZE VÝSLEDKŮ

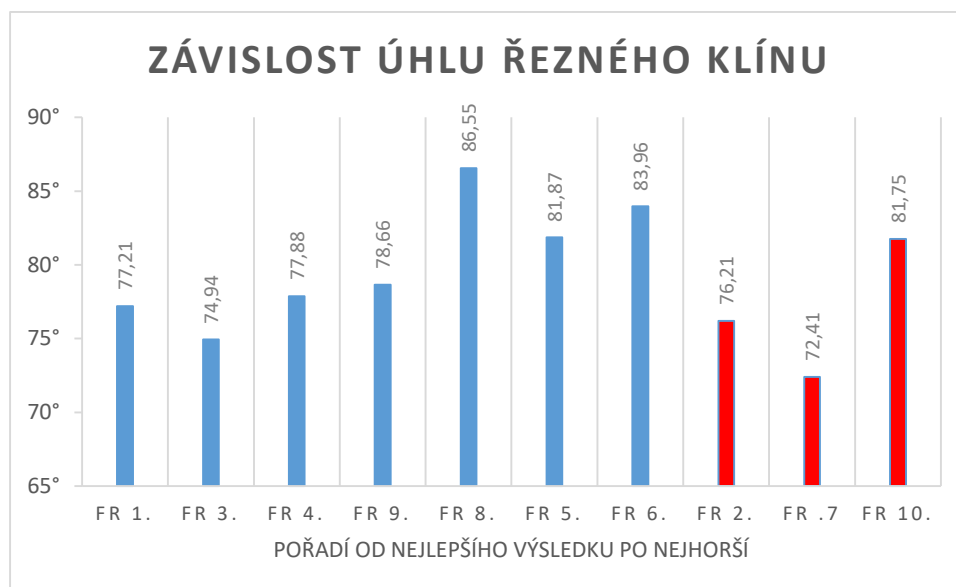
Hlavním cílem práce bylo navrhnout, vyrobit a otestovat frézy frézováním kaleného materiálu, následně zjistit zda vůbec dokážou obrábět zakalený polotovar a vyhodnotit účinnost fréz porovnáním drsnosti obrobeneho materiálu a zjistit závislosti mezi zvolenými parametry. Obráběným materiálem byla zakalená ocel 42CrMo4 o tvrdosti 48-49 HRC.

Na následujícím obrázku (Obr. 40) je zobrazena závislost úhlů čela v zubové drážce α a úhlů hřbetu β . Lze si všimnout rozdílu mezi nástroji, které dokončily test a které selhaly (zaznačené červeně). Selhaly téměř všechny nástroje, které měly úhel α větší než úhel β . Pro porovnání zvolíme frézy č. 1 a 2, velikost úhlů je podobná avšak opačně zvolená (viz obr. 40).



Obrázek 40 Závislost úhlů α a β

Lze si i povšimnout určité závislosti úhlu řezného klínu na pořadí nástrojů. Jako nejvhodnější úhel řezného klínu se podle naměřených dat pohybuje kolem 77° . Toto tvrzení platí pouze při zvolení správného úhlu α .



Obrázek 41 Závislost úhlu řezného klínu

Pokud vezmeme v úvahu doplňující parametry a zhodnotíme první tři frézy, které měly relativně podobné úhly řezného klínu, zjistíme, že pro obrábění kaleného materiálu je vhodnější úhel šroubovice 30° , zvolit nerovnoměrné dělení a vybrat hlubší drážku. Tabulka 18 je barevně rozdělená. Zeleně jsou označeny frézy, které lze vyhodnotit jako vhodné pro obrábění kaleného materiálu. Oranžově označené nástroje sice dokončily obráběcí cyklus ale vzhledem k jejich opotřebení a dosaženým výsledkům drsnosti povrchu, byly označeny jako nevhodné. Poslední tři červeně označené nástroje byly vyhodnoceny jako zcela nevhodné pro obrábění kaleného materiálu.

Tabulka 18 Tabulka doplňujících parametrů fréz

Pořadí	Číslo frézy	Úhel čela v zubové drážce (α)	Úhel hřbetu (β)	Úhel šroubovice (γ)	Nerovnoměrné dělení břitů (λ)	Hloubka drážky (h)[mm]
1.	1	4,91°	7,88°	29,65°	ANO	2,5
2.	3	5,29°	9,77°	32,96°	NE	2
3.	4	4,22°	7,9°	42,49°	ANO	2,5
4.	9	1,7°	9,64°	32,96°	ANO	2
5.	8	1,67°	1,78°	39,82°	NE	2,5
6.	5	1,88°	6,25°	30°	NE	2
7.	6	3,58°	2,46°	42,69°	ANO	2,5
8.	2	8,33°	5,46°	29,93°	NE	2,5

FR 3.
FR 6.
FR 2.
FR .7
FR 10.

9.	7	9,7°	7,89°	32,98°	ANO	2
10.	10	5,75°	2,5°	29,94°	NE	2

ZÁVĚR

V této bakalářské práci byla hodnocena účinnost fréz určených pro obrábění kaleného materiálu. Práce se dělí na dvě části – teoretickou a praktickou. V teoretické části bylo popsáno tepelné zpracování oceli, byly popsány vnitřní struktury materiálu po působení tepelného zpracování a podrobně charakterizována metoda kalení. Také zde byla popsána technologie frézování. V závěru teoretické části je uveden popis a charakteristika nástrojů pro frézování.

V praktické části byl popsán experiment, na jehož základě byla navržena nástrojová geometrie vhodná pro obrábění kaleného materiálu. V první části bylo navrženo deset testovacích fréz a objasněn výrobní proces nástrojů. Dále byly uvedeny rezné podmínky a bylo popsáno CNC obráběcí centrum, na kterém se prováděl experiment. V poslední části proběhlo vyhodnocení výsledků.

Srovnáním deseti navržených fréz bylo zjištěno, že nejvhodnější nástrojovou geometrií pro obrábění kaleného materiálu je nástrojová geometrie frézy č. 1. Jedná se o geometrii kdy úhel čela zubové drážky je 5° a úhel hřbetu 8° , úhel šroubovice 30° , je použito nerovnoměrné dělení a hloubka drážky činí 2,5 mm. Nejméně vhodnými pak byly frézy, které měly úhly čela větší než úhly hřbetu. Je nutné dodat, že tento výsledek byl stanovený při daných rezných podmínkách. To znamená, že při obrábění stejného materiálu ale za jiných rezných podmínek, by se výsledek mohl částečně lišit. Technolog by při navrhování nástrojů pro konkrétní výrobu měl tuto závislost zahrnout v potaz.

Z důvodů zkrácení obráběcího času pro účel experimentu nebylo provedeno povlakování nástrojů. Pro účel experimentu to nebylo vyžadující, nicméně v běžném provozu by volba nepovlakované frézy byla velice neekonomická. Za poměrně krátký obráběcí čas, v porovnání s časem životnosti uváděným z katalogových nástrojů, byly všechny nástroje opotřebené a na každém došlo k vyštípnutí materiálu. Z toho lze usoudit, že při návrhu nástroje pro obrábění kaleného materiálu je nezbytně nutné povlak použít. Pro příklad firma IONBOND CZECHIA s.r.o. disponuje povlaky určenými pro obrábění tvrdých materiálů.

Vyhodnocení nástrojové geometrie bude sloužit k výběru ideálního rezného nástroje pro frézování kaleného materiálu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] TOTTEN, George E., ed. *Steel heat treatment: Metallurgy and technologies*. Second edition. Portland, Oregon, U.S.A.: Taylor & Francis Group, 2007. ISBN 978-0-8493-8455-4.
- [2] HLUCHÝ, M., O. MODRÁČEK a R. PAŇÁK. *Strojírenská technologie 1: metalografie a tepelné zpracování*. 2.díl. Praha: Scientia, 2013. ISBN 978-80-7183-265-2.
- [3] CLAUDIO TESTANI. *Heat Treatment of Steels*. Rome: MDPI AG, 2021. ISBN 3036523898.
- [4] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
- [5] KRAUS, Václav. *Tepelné zpracování a slinování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-708-2582-0.
- [6] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. 1. vydání. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0600-1.
- [7] ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. ISBN 80-718-3337-1.
- [8] HAROLD HALL. *The Milling Machine*. First edition. Fox Chapel Publishing, 2013. ISBN 1565237692.
- [9] MELISSA RAMIREZ. *Milling: Fundamentals, Processes and Technologies*. First edition. Portland, Oregon, U.S.A.: NOVA, 2015. ISBN 978-1-63483-022-5.
- [10] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008. ISBN 978-80-7361-.
- [11] Příručka obrábění: kniha pro praktiky. Praha: Scientia, 1997. ISBN 91-972-2994-6.
- [12] HUMÁR, A. a M. PÍŠKA. *Technologie frézování*. MM Průmyslové spektrum. 2004, 2004(), 26-46.
- [13] *Metal Cutting Theory and Practice*. 3 ed. Velká Británie: Taylor & Francis Ltd, 2019. ISBN 9780367868192.
- [14] TUMLIKOVO.CZ. In: *TUMLIKOVO.CZ: Metal cutting technologies* [online]. [cit. 2022-01-24]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/geometrie-britu-frez/>
- [15] MT Nástroje. In: *MT Nástroje* [online]. [cit. 2022-01-24]. Dostupné z: <https://www.mt-nastroje.cz/Freza-DIN1880-nastrcna-hrubozuba-HSSCo5-D40-d14057.htm>
- [16] JK Nástroje. In: *JK Nástroje* [online]. [cit. 2022-01-24]. Dostupné z: <https://jk-nastroje.cz/shop/4-brite-s-nest-delenim-britu/71-freza-tvrdokovova-s-nestejnym-delenim-britu-4-brita-o-20-mm.html>
- [17] DAVIS, Joseph R. *Tool materials. Materials Park*: ASM International, 1995. ASM specialty handbook. ISBN 08-717-0545-1.
- [18] Souhrnný katalog WEAR PARTS. In: *Souhrnný katalog WEAR PARTS* [online]. [cit. 2022-01-24]. Dostupné z: <https://cdn.plansee-group.com/is/content/planseemedia/cerazitiz/downloads/pdf/wear-parts-main-catalogue/CS.pdf>

- [19] SMITH, Graham T. *Smith. Cutting Tool Technology: Industrial Handbook*. 2008th. London: Springer, 2008. ISBN 978-1848002043.
- [20] *Technologies of Coatings and Surface Hardening for Tool Industry*. MDPI AG, 2021. ISBN 3036524525.
- [21] LE RÉPERTOIRE DE LA MACHINE OUTIL [online]. [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://www.machine-outil.com/actualites/t465/a2747-walter-machines-presente-sa-nouvelle-machine-de-mesure-helichack-basic.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Ms	martenzit start
Mf	martenzit finiš
v_c	řezná rychlost
D	průměr nástroje
n	počet otáček
f_z	posuv na zub
f_n	posuv na otáčku
v_f	rychlost posuvu
z	počet zubů nástroje
α	úhel čela zubové drážky
β	úhel hřbetu
γ	úhel šroubovice
λ	nerovnoměrné dělení
h	hloubka drážky
%	procenta
°C	stupeň celsia

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Schéma průběhu tepelného zpracování [2]	12
Obrázek 2 Rovnovážný diagram metastabilní (plná čára) soustavy železo–uhlík (čárkovaná čára označuje rovnovážný stabilní soustavy slitiny) [3]	13
Obrázek 3 Závislost teplot (M_s) a (M_f) na obsahu uhlíku v austenitu před kalením [3]	15
Obrázek 4 Rychlost ochlazování v ARA diagramu -transformace austenitu na martenzit [3]	15
Obrázek 5 Průběh rychlosti ochlazování IRA diagram -transformace austenitu na bainit [3]	16
Obrázek 6 Mikrostruktura horního a dolního bainitu [5]	16
Obrázek 7 Rozdělení druhů kalení [5]	18
Obrázek 8 a) frézování obvodem válcové frézy, b) frézování čelem čelní frézy [6]	20
Obrázek 9 Frézování sousledné a nesousledné [7]	21
Obrázek 10 Úhly v profilu břitu frézy [10]	26
Obrázek 11 a) Monolitní fréza ze slinutého karbidu	27
Obrázek 12 Struktura tvrdokovu [14]	27
Obrázek 13 Nanesený povlak [15]	28
Obrázek 14 Schéma frézy	33
Obrázek 15 Grafický návrh frézy	33
Obrázek 16 Řezačka TM 374	34
Obrázek 17 Polotovar frézy	35
Obrázek 18 <i>Stroj HELITRONIC BASIC</i>	36
Obrázek 19 Polotovar v kleštinovém upínači s prodloužením	37
Obrázek 20 Průběh výroby frézy	37
Obrázek 21 Vyrobena fréza	38
Obrázek 22 CNC měřicí stroj HELICHECK BASIC 3 [16]	39
Obrázek 23 Schéma obrobku	42
Obrázek 24 Zakalený polotovar	43
Obrázek 25 Stopy po provedené zkoušce tvrdosti	43
Obrázek 26 Obráběcí centrum MCV 754 QUICK	44
Obrázek 27 Upnutá fréza ve stroji	44
Obrázek 28 Obrobek ve strojním svěráku	45
Obrázek 29 Průběh frézování	46
Obrázek 30 Zlomená fréza č. 2	47
Obrázek 31 Vyhodnocení hodnoty R_a	49
Obrázek 32 Vyhodnocení hodnoty R_z	49

Obrázek 33 Graf znázorňující rostoucí tendenci zatížení vřetene	50
Obrázek 34 Zatupená hrana frézy č.1	50
Obrázek 35 Zatupená hrana a místní vyštípnutí frézy č. 1	51
Obrázek 36 Zatupená hrana, četná vyštípnutí a mikrotrhliny (fréza č. 8)	51
Obrázek 37 Velké vyštípnutí na břitu (fréza č. 6).....	52
Obrázek 38 Detail zdeformovaného hřbetu frézy č. 6	52
Obrázek 39 Vyštípaný břit frézy č. 7	53
Obrázek 40 Závislost úhlů α a β	54
Obrázek 41 Závislost úhlu řezného klínu	55

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Navržené nástroje	32
Tabulka 2 Parametry stroje HELITRONIC BASIC	36
Tabulka 5 Fréza č. 1	39
Tabulka 4 Fréza č. 2	39
Tabulka 5 Fréza č. 3	40
Tabulka 6 Fréza č. 4	40
Tabulka 7 Fréza č. 5	40
Tabulka 8 Fréza č. 6	40
Tabulka 9 Fréza č. 7	41
Tabulka 10 Fréza č. 8	41
Tabulka 11 Fréza č. 9	41
Tabulka 12 Fréza č. 10	41
Tabulka 13 Chemické vlastnosti oceli 42CrMo4	42
Tabulka 14 Řezné rychlosti při obrábění	45
Tabulka 15 Tabulka zatížení vřetena	47
Tabulka 16 Tabulka naměřené stření aritmetické úchylky	48
Tabulka 17 Tabulka naměřené výšky nerovnosti profilu	48
Tabulka 18 Tabulka doplňujících parametrů fréz	55