

Návrh a výroba stopkové frézy

Kamil Sjekel

Bakalářská práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Kamil Sjekel
Osobní číslo:	T22036
Studijní program:	B0788A270001 Procesní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Návrh a výroba stopkové frézy

Zásady pro vypracování

- Teoretická studie zahrnující přehled typů fréz a jejich použití, princip frézování, materiály a technologie používané při výrobě fréz.
- Návrh koncepce frézy CAD modelováním.
- Realizace návrhu frézy podle vytvořeného modelu.
- Prezentace naměřených hodnot a parametrů frézy.
- Diskuze o možnostech optimalizace a vylepšení návrhu.

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

Seznam doporučené literatury:

ČSN 22 0016. Rezné nástroje. Frézy. Názvoslovie. Praha: Český normalizační institut, 20 p.

ŠTULPA, Miloslav. Technologie obrábění: CNC soustružení, frézování, vrtání pro praxi. Grada, 2022. ISBN 978-80-271-2883-9.

NEE, John G., et al. Fundamentals of tool design. Society of manufacturing engineers, 2010.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2025**
Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2025**

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

L.S.

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 10. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení bakalářské práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- 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 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(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....

podpis autora

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na konstrukční návrh frézy, taktéž se zabývá výrobou funkční tvarové frézy určené k obrábění hliníku a jeho slitin. V teoretické části byla shrnuta jedna z metod třískového obrábění – frézování a jeho užití v technické praxi. Dále bylo popsáno možné úskalí při použití rozdílných druhů materiálu při frézování, geometrii frézy a jednotlivém rozdělení fréz podle různých aspektů. Souvisejícím tématem při návrhu a konstrukci řezného nástroje je řešerše materiálů, ze kterých jsou výrobky vytvořeny. V praktické části závěrečné práce byl vytvořen model, podle něhož byl zhotoven řezný nástroj.

Klíčová slova: fréza, řezný nástroj, třískové obrábění, frézování, konstrukční návrh

ABSTRACT

This bachelor thesis focuses on the design of the milling machine and also deals with the production of a functional shape milling machine designed for machining aluminium and its alloys. The theoretical part summarizes one of the methods of chip machining – milling and its use in technical practice. Furthermore, the possible pitfalls of using different types of material in milling, the geometry of the milling cutter and the individual classification of milling cutters according to different aspects were described. A related topic in the design and construction of the cutting tool is the research of the materials from which the products are made. In the practical part of the thesis, a model was created, according to which the cutting tool was made.

Keywords: milling cutter, cutting tool, machining, milling, structural design

*„Ovšem věc se má jednoduše takto:
nemůžeme mít všechno; jsou zákony, o kterých
nic nevíme, život nás dotlačí k tomu, že
skončíme v plamenech nebo na mrazu; co dožene
ptáče do kočičího chřtánu, k tomu nemáme
co říct.“*

Ch. Bukowski (O pití)

OBSAH

ÚVOD.....	13
I TEORETICKÁ ČÁST	14
1 FRÉZOVÁNÍ.....	15
1.1 ROVINNÉ FRÉZOVÁNÍ	16
1.2 FRÉZOVÁNÍ DUTIN	18
1.3 HRUBOVÁNÍ A DOKONČOVÁNÍ.....	18
1.4 FRÉZOVÁNÍ ZAPICHOVÁNÍM	18
1.5 ZAFRÉZOVÁNÍ POD ÚHLEM – RAMPOVÁNÍ	18
1.6 FRÉZOVÁNÍ ZÁVITŮ	19
1.7 FRÉZOVÁNÍ ROTAČNÍ.....	19
1.8 SRAŽENÍ HRAN, ODJEHLENÍ	20
1.9 OBRÁBĚNÍ VYSOKÝMI POSUVY	20
1.10 FRÉZOVÁNÍ ŠROUBOVOU A KRUHOVOU INTERPOLACÍ	20
1.11 ODVALOVACÍ FRÉZOVÁNÍ	21
1.12 TRÍSKY	21
2 OBROBITELNOST MATERIÁLŮ PŘI FRÉZOVÁNÍ A VÝZNAM SPRÁVNÉ VOLBY FRÉZY	23
2.1 OBROBITELNOST OCELI	24
2.1.1 Oceli v závislosti na obsahu legujících prvků.....	24
2.1.2 Oceli v závislosti na obsahu uhlíku.....	24
2.1.3 Oceli v závislosti na tepelném zpracování	24
2.2 OBROBITELNOST LITINY	24
2.3 OBROBITELNOST HLINÍKU A HLINÍKOVÝCH SLITIN	25
2.4 OBROBITELNOST MĚDI A MĚDĚNÝCH SLITIN	25
2.5 OBROBITELNOST TITANU A JEHO SLITIN	26
2.6 OBROBITELNOST POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ	26
2.7 OBROBITELNOST HYBRIDNÍCH MATERIÁLŮ	28
2.8 OBROBITELNOST GRAFITU	29
2.9 OBROBITELNOST DŘEVA.....	29
3 FRÉZY	30
3.1 POPIS FRÉZY	31
3.1.1 Těleso frézy	31
3.1.2 Obvod frézy.....	32
3.1.3 Průměr frézy.....	32
3.1.4 Boky, čelo, zadní strana a šířka frézy	32
3.1.5 Čelo zubu	32

3.1.6	Hřbet zubu	32
3.1.7	Úhel břitu.....	33
3.1.8	Fazeta (zábřit).....	33
3.1.9	Úhel sklonu ostří (břitu) zubu	33
3.1.10	Ostří (břit).....	33
3.1.11	Úhel čela.....	34
3.1.12	Úhel hřbetu	35
3.1.13	Počet zubů a zubová drážka	36
3.2	ROZDĚLENÍ FRÉZ	37
3.2.1	Podle způsobu upínání.....	37
3.2.2	Podle tvaru a ploch, na nichž leží břity	45
3.2.3	Podle směru břitu a směru šroubovice	46
3.2.4	Podle počtu zubů	46
3.2.5	Podle konstrukce	46
3.3	OSTATNÍ.....	57
3.3.1	Letmé frézy.....	57
3.3.2	Okružní pily na kov	57
3.3.3	Frézovací hlavy	58
3.3.4	Frézy používané v lékařství.....	60
4	BROUŠENÍ	62
5	MATERIÁLY POUŽÍVANÉ K VÝROBĚ NÁSTROJŮ.....	63
5.1	RYCHLOŘEZNÉ OCELI	63
5.2	STELLITY	64
5.3	SLINUTÉ KARBIDY	65
5.4	KERAMICKÉ ŘEZNÉ MATERIÁLY	65
5.5	POLYKRISTALICKÝ KUBICKÝ NITRID BORU	66
5.6	POLYKRISTALICKÝ DIAMANT	66
5.7	KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	67
5.8	CERMETY	67
6	POVLAKY	68
6.1	METODA CVD.....	69
6.2	METODA PVD	71
7	POČÍTAČOVÁ PODPORA KONSTRUKCE.....	72
8	POČÍTAČOVÁ PODPORA OBRÁBĚNÍ.....	75
8.1	NUMROTO	76
9	SOFTWARE PRO INŽENÝRSKOU SIMULACI	78
10	SHRNUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE	81
II	PRAKTICKÁ ČÁST	82
11	CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE	83

12	VÝCHOZÍ MODEL.....	84
13	NÁVRH FRÉZY	85
13.1	TVAR FRÉZY	86
13.2	VOLBA POČTU ZUBŮ	87
13.3	STANOVENÍ ÚHLU ČELA.....	88
13.4	VOLBA DRÁŽKY	88
13.5	NÁVRH PRŮMĚRU JÁDRA NÁSTROJE	89
13.6	ÚHEL HŘBETU A ČELA	89
14	VÝROBA FRÉZY	92
14.1	VÝROBNÍ VÝKRES	92
14.2	VOLBA MATERIÁLU ŘEZNÉHO NÁSTROJE.....	92
14.3	DĚLENÍ MATERIÁLU	94
14.4	OBRÁBĚNÍ	94
14.5	OMÍLÁNÍ PŘED POVLAKEM	102
14.6	POVLAK.....	105
14.7	OMÍLÁNÍ PO POVLAKU	106
14.8	ZABALENÍ A OPATŘENÍ KRABÍČKY ŠTÍTKEM	108
	ZÁVĚR	110
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	111
	SEZNAM OBRÁZKŮ	118
	SEZNAM TABULEK.....	122
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	123
	SEZNAM PŘÍLOH.....	126

ÚVOD

Metody třískového obrábění, frézování nevyjímaje, urazily dlouhou cestu vývoje. Především se zvýšila přesnost obráběných součástí a zkrátil výrobní čas. Aby bylo možné dojít k požadovanému výsledku ve formě přesného výrobku podléhajícímu tolerancím předepsané drsnosti, musí se ruku v ruce vyvíjet i řezné nástroje. Díky přesným brousicím strojům, které jsou s to operovat v řádech tisícín milimetrů, můžeme vyrábět velice přesné nástroje. Příkladem jsou mikrofrézy, jejichž průměry startují na jedné desetině milimetru. Vyměnitelné břitové destičky prodlužují životnost nástrojů, díky nim mj. můžeme obrábět vysokými posuvy. Dále můžeme konečné tvary nástrojů definovat 3D laserovým obráběním, také je možné diamantové povlaky nanesené na řezných nástrojích brousit laserem. Moderní technologií na poli strojírenství je aditivní, to jest 3D tisk z kovu. Umožňuje optimalizaci chlazení nástrojů formou integrovaného přívodu kapaliny do místa řezu. Rozmanitost, nabídka a vývoj nástrojů jsou dány poptávkou trhu, nicméně jsou do jisté míry spjaty s konkurenčním bojem a jím i poháněny. Aby mohly výrobní společnosti v dnešní době čelit konkurenci z Asie nebo Jižní Ameriky, kde jsou náklady na výrobu i konečná cena výrobků nižší, musí neustále prokazovat znalosti v daném oboru, spolehlivost i schopnosti. Nástroje těmito firmami vytvořené jsou kvalitní a přesné. V regionální firmě K-TOOLS byla provedena praktická část této práce zabývající se konstrukčním návrhem a výrobou stopkové frézy určené k frézování hliníku. Nástroj je zhotoven ze slinutých karbidů, opatřen chladicím kanálkem a je na něm nanesen povlak, což má za následek prodloužení životnosti nástroje a zlepšení drsnosti obrobené plochy.

I TEORETICKÁ ČÁST

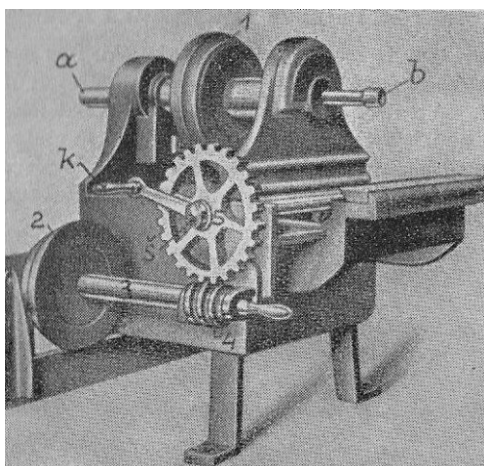
1 FRÉZOVÁNÍ

Je charakterizováno mechanickou interakcí ostrého nástroje s materiálem obrobku, která způsobuje smykové efekty uvnitř materiálu podél definovaných drah, což nakonec vede k odstranění materiálu obrobku ve formě třísek. Jinak řečeno jedná se o třískové obrábění.

Podmínkou frézování, stejně jako u dalších metod obrábění (např. soustružení, vrtání, hoblování, obrážení, protahování), je relativní pohyb mezi nástrojem a obráběným materiálem.

Vzájemný pohyb mezi nástroji se sestává z hlavního (rotačního) pohybu, který koná nástroj (fréza) a vedlejších sdružených pohybů, které koná převážně obrobek (posuv a hloubka záběru). [1]

První sofistikovanější frézovací stroj vznikl na počátku devatenáctého století. V poslední době jsou klasické frézky ve firmách (většinou) nahrazovány *CNC* stroji. To snižuje náklady na obsluhu, při omezení lidského faktoru se zmírňuje chybovost na vyrobených kusech a v neposlední řadě se při velkosériové výrobě snižuje čas. Technologie frézování se zdokonalovala a vyvíjela do podoby, jakou známe dnes. [2]



Obrázek 1 Frézovací stroj z devatenáctého století (vlevo) a 5osé frézovací centrum UMC-1000 (vpravo)

(Zdroj: [2; 3])

1.1 Rovinné frézování

U rovinného frézování záleží mj. na poloze frézy vůči obrobku. Podle polohy nástroje je dělíme na stranové sousledné, středové, stranové nesousledné. Tyto difference ovlivňují jakost obráběného povrchu, chvění při obrábění a životnost nástroje. Důležitým aspektem je stav a vhodnost stroje, opotřebení a předpokládaná životnost nástroje, a také úvaha, zda firma disponuje akceschopným nástrojem, nebo je potřeba koupit nový, tvar obráběného dílce. [4]

1.1.1 Frézování obvodem frézy

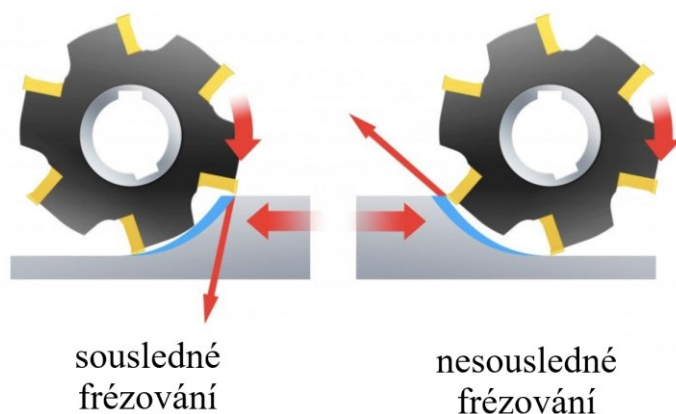
Oproti frézování čelem frézy je frézování obvodem frézy méně výkonné. Osa nástroje je kongruentní s obráběnou plochou. Podle typu pohybu nástroje vůči obrobku můžeme frézování rozlišit na sousledné nebo nesousledné. [4]

1.1.1.1 *Sousledné frézování*

Posuv obrobku je koncipován do záběru ve směru otáčení frézy, při rotaci nástroje odebírají zuby frézy kusy materiálu – třísku – od největší tloušťky po nejmenší. Řezné síly přitlačují obrobek k upínací ploše. Frézování je dynamické, přičemž ostří zubu „neklouže“ po materiálu a dochází k menšímu přenosu tepla mezi frézovaným materiálem a nástrojem. Ergo na nástrojích jsou menší stopy opotřebení. Lze proto volit větší posuvy a větší řeznou rychlost. Hlavní uplatnění nalezneme převážně u dokončovacích operací, protože takto dosáhneme kvalitnějšího povrchu než u nesousledného frézování. [4]

1.1.1.2 *Nesousledné frézování*

Hlavní diferencí mezi sousledným a nesousledným frézováním je reciproký posuv obrobku vůči nástroji. Obrobek se posouvá do záběru proti směru rotace frézy, ostří nástroje odebírá třísku od nejmenší tloušťky po tu největší. Ostří zubu má zpočátku problém s penetrací materiálu, „klouže“ po něm, dokud není dostatečná hloubka řezu, aby mohl nástroj odebírat třísku. Při nesousledném frézování se vlivem tření vytváří více tepla, fréza se více zahřívá a více se opotřebovává (dochází k dřívějšímu otupění ostří nástroje). Řezné síly jsou inverzní oproti upínacím silám a mají snahu vytrhnout obrobek z upínače. Esenciální využití je převážně při hrubování, jelikož dosahujeme méně kvalitních povrchů než u sousledného frézování. V praxi se s touto metodou setkáme u frézování u výkovků a odlitků, které mají tvrdou povrchovou vrstvu. [4]



Obrázek 2 Sousedné a nesousedné frézování

(Zdroj: [5])

1.1.2 Frézování čelem frézy

Osa frézy je kolmá k obráběné ploše, v záběru je stále několik zubů. Odběr třísky mají na starosti zuby na válcové ploše, zuby na čelní ploše pouze hladí. Zuby nástroje odebírají třísky téměř konstantního průřezu třísky, průřez třísky se mění jen velmi málo. Frézování je plynulé, kvalita obrobenej plochy je lepší než u obrábění obvodem frézy. Jedná se o výkonné frézování. [4]

Na základě průměru frézy lze čelní frézování rozřadit do čtyř skupin, a sice:

- a. Průměr frézy je o 20-50 % větší než šířka obrobku* – Osa frézy musí být mimo osu obrobku.
- b. Šířka obrobku je malá, průměr frézy je větší* – Osa frézy musí být odsazena od hrany obrobku.
- c. Frézování do plna* – Frézu obklopuje materiál, 100 % průměru frézy v záběru, častý děj při první tříse.
- d. Osa frézy v ose obrobku* – Šířka obrobku je menší nebo stejná jako průměr frézy. Nevhodné z hlediska vytváření ostrin při výstupu ostří z obrobku vlivem úhybu třísky.

1.2 Frézování dutin

Pokud se nejedná např. o frézování pravoúhlých (klínových) drážek na hřídeli, tak se většinou musí volit speciální nástroj, který definuje tvar dutiny. [4]

Drážek existuje celá škála a lze je dělit hned několika způsoby. Rozdělení drážek z hlediska tvaru – *pravoúhlé* (tvaru U, tvaru T), *tvarové* (rádiusové, modulové), *úhlové* (souměrné, nesouměrné, rybinové) nebo *speciální* (při nenormalizovaném „jedinečném“ tvaru otvoru se musí vyrobit tvarový nástroj, který kopíruje jeho tvar). Rozdělení drážek z hlediska hloubky – *průchozí* nebo *zapuštěné*. Rozdělení drážek z hlediska průběžnosti – *průběžné*, *polozavřené* nebo *uzavřené*

1.3 Hrubování a dokončování

Ve většině případů kusové a malosériové výroby (za předpokladu, že nepočítáme např. tvarově složité dílce, obrobky s vyššími požadavky na jakost obráběné plochy aj.) postačí jeden nástroj, který vykoná celý obráběcí cyklus.

S tvarově složitějšími, rozměrnějšími výrobky roste strojní čas, proto je vhodné se zamyslet nad strategií obrábění a počtem upotřebených nástrojů. V praxi se volí větší průměr frézy na předhrubování, menší na hrubování a nejmenší na hlazení. Do strojního času se mj. započítá výměna nástroje, proto by se měly brát v úvahu i ztráty způsobené výměnou nástroje.

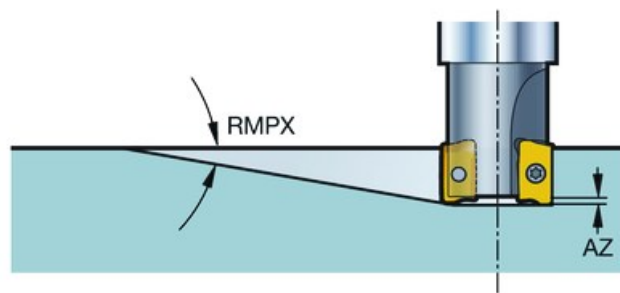
Napojení dvou nástrojů, aby si obrobek udržel vysokou jakost (např. napojení dna s kónickou plochou), spočívá ve správném stanovení korekcí. [4]

1.4 Frézování zapichováním

Vyžívá se při hrubování a dokončování kolmých svislých ploch, plochy hlubokých dutin. [4]

1.5 Zafrézování pod úhlem – rampování

Výsledkem je vyfrézování „rampy“ na obrobky. Často používaným nástrojem je fréza s VBD, kde přední destička je při obrábění v kontaktu s primárním břitem na obvodu nástroje a současně se sekundárním břitem na čele nástroje, kdežto zadní destička odebírá třísku sekundárním břitem na čele nástroje. Konkrétní údaje pro nastavení CNC programu udává výrobce. [4]

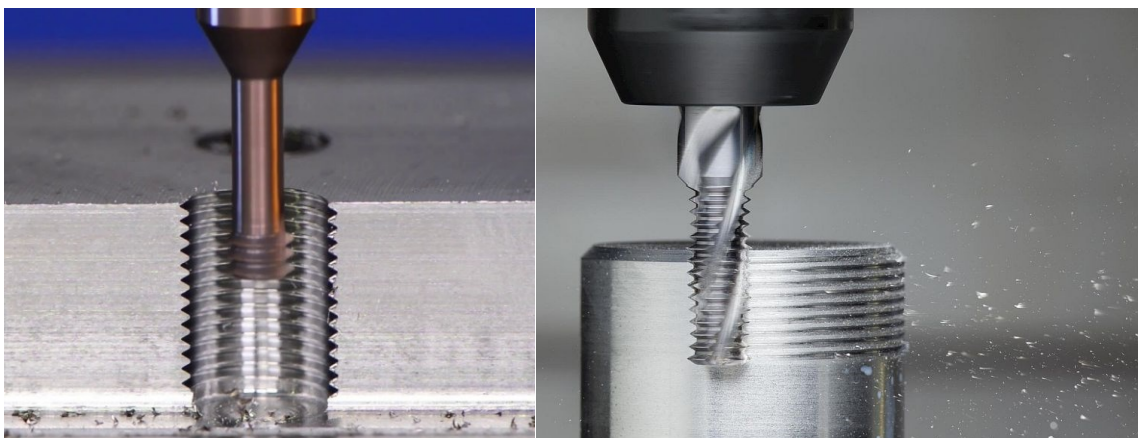


Obrázek 3 Rampování

(Zdroj: [6])

1.6 Frézování závitů

Aby došlo k vytvoření závitu frézováním, je potřeba, aby stroj disponoval možností šroubové interpolace. Závit je zhotoven stopkovou frézou s profilem závitu ve tvaru drážek s roztečí požadovaného stoupání. Jedním nástrojem je možno vytvořit pravé i levé závity (rozdíl je v nájezdu při stejném smyslu otáček), také jedním nástrojem lze vytvořit závity odlišných průměrů. [4]



Obrázek 4 Frézování vnitřního (vlevo) a vnějšího závitu (vpravo)

(Zdroj: [7])

1.7 Frézování rotační

Uplatní se na frézkách s možností obrábět ve 4D nebo 5D. Eventuálně tam, kde je obrobek značně nevyvážený, popřípadě značně prostorově náročný. [4]

Lze dělit na:

- a. rotační obrábění frézou, která je kolmo k obráběné ploše;*
- b. rotační obrábění frézou, která je podél obráběné plochy.*

1.8 Sražení hran, odjehlení

Na sražení hran nebo odjehlení dříve zhotovených otvorů se používá speciální nástroj. Odebrání materiálu může být provedeno oboustranně (z jedné i druhé strany obrobku), aniž by obrobek musel být upnut na pracovním stole jinak. [4]

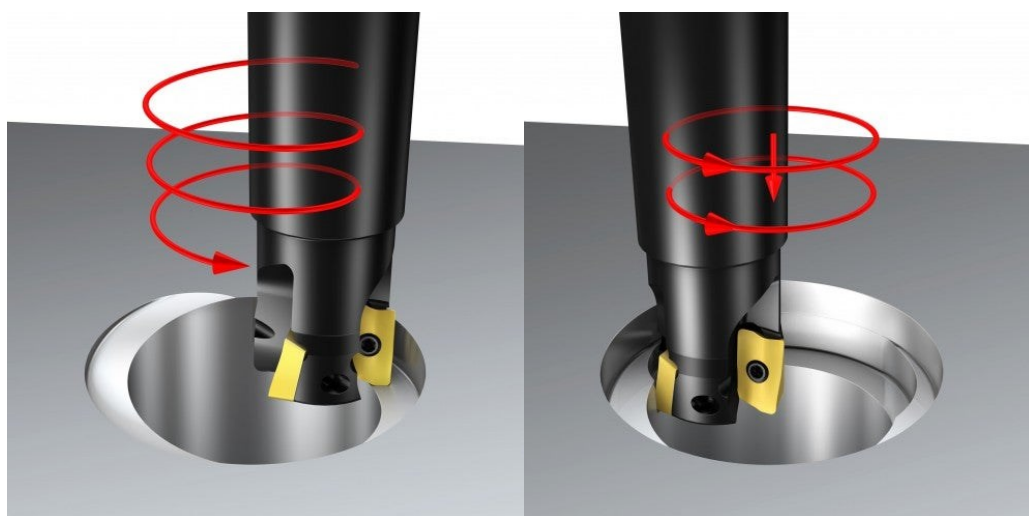
1.9 Obrábění vysokými posuvy

Tato metoda a označovaná jako *High Feed Cutting (HFC)* stojí na odolných frézách s vyměnitelnými břitovými destičkami, které umožňují obrábění s vysokými posuvy. Výsledkem je zvýšená produktivita výroby. [4]

1.10 Frézování šroubovou a kruhovou interpolací

Frézování šroubovou (spirálovou) interpolací – Je to stejný princip jako u rampování, tj. sestup nástroje pod úhlem, který probíhá po kruhové dráze. Důležitým aspektem při volbě této obráběcí strategie je průměr frézy. Nedostatečně velký průměr způsobí neúplné odebrání materiálu na celé ploše, v ose díry zůstane jádro. Naopak u nadměrného průměru nástroje dráha břitové destičky nemusí procházet osou nefrézujícího průměru, což má za následek tvorbu výčnělku na obrobku. [4]

Frézování kruhovou interpolací – Nástroj nejprve najede do nastavené hloubky třísky, poté kruhově objíždí konturu do požadovaného průměru. Cyklus se opakuje do té doby, než se dostaneme na požadovanou hodnotu. Ostří frézy vede do středu osy rotace. [4]



Obrázek 5 Postupné zahlubování se šroubovicovou interpolací (vlevo) a frézování s kruhovou interpolací (vpravo)

(Zdroj:[8])

1.11 Odvalovací frézování

Frézování, kdy současně rotuje nástroj (hlavní řezný pohyb, současně se posouvá) i obrobek (otáčivý odvalovací pohyb). Používá se pro výrobu drážek, čelního a šikmého ozubení ozubených kol. [4]

1.12 Třísky

Třísky jsou výsledkem obrábění, jeho vedlejším produktem, řezný nástroj odděluje z obrobku parciální vrstvy materiálu, stanovené hloubkou řezu, vlivem trvalého zatěžování. Průběh oddělování třísky ovlivňuje mnoho aspektů, zejména fyzikální vlastnosti obráběného materiálu a jejich závislost na podmínkách plastické deformace. Třísky mohou mít nepříznivý dopad na obrábění, potažmo na řezný nástroj. [9; 10]

Rozdělení třísek

Druh třísky určuje poměr meze pevnosti v tahu R_m , meze kluzu ve smyku R_e , a meze pevnosti ve smyku R_{ms} . Vznik, oddělování a konečný tvar třísky je odlišný u krystalických a nekrystalických látek. Hlavní slovo při vnikání břitu nástroje do obrobku u krystalických látek má plastická deformace obráběného materiálu, načež vzniká tvářená tříska. Naopak u nekrystalických látek nedochází k plastické deformaci, vzniklá tříska je netvářená, odděluje se od celku křehkým lomem nebo štěpením.

Druhy tvářených třísek

Tvářené třísky lze rozdělit na dva hlavní typy, a sice na tvářené třísky soudržné a částečně tvářené třísky.

Jejich tvar a výskyt je obtiskem mnoha formujících faktorů, které vypovídají o průběhu procesu obrábění. Další dělení tvářených třísek je podle nabytého tvaru:

- *Plynulá článkovitá soudržná tříska* – Vytváří se při obrábění většiny ocelí.
- *Plynulá soudržná lamelová tříska* – Vzniká u většiny korozivzdorných ocelí.
- *Tvářená elementární tříska* – Je výsledkem obrábění většiny litin.
- *Nepřavidelně článkovitá plynulá tříska* – Tvoří se při obrábění materiálů s velkým procentem legujících prvků.
- *Tvářená plynulá soudržná tříska* – Existence je podmíněna aplikací malých řezných sil při obrábění, např. při obrábění hliníku.

- *Dělená segmentová tříška* – Vzniká za opačných podmínek než tvářená plynulá soudržná tříška čili za působení velkých řezných sil a při vysokých teplotách řezání, např. při obrábění tvrdých materiálů.
- *Plynulá segmentová tříška* – Nalezneme ji zejména při obrábění titanu.

2 OBROBITELNOST MATERIÁLŮ PŘI FRÉZOVÁNÍ A VÝZNAM SPRÁVNÉ VOLBY FRÉZY

Obrobitelnost je schopnost materiálu vytvářet při třískovém obrábění požadovaný tvar, rozměr a jakost povrchu s přiměřenou spotřebou energie a opotřebením nástroje – náleží k nejdůležitějším kritériím při návrhu frézovacích operací. Chemické složení, mikrostruktura a fyzikálně-mechanické vlastnosti obrobku rozhodují o tom, jaký rezný materiál, geometrii břitu, povlak a chlazení je třeba zvolit, aby bylo obrábění produktivní a ekonomické.

Tabulka 1 Přehled vývoje materiálů z historického hlediska

	Rok začátku technického využívání v širším rozsahu
Přírodní materiály	
Dřevo, keramické minerály, zlato, měď, meteority	Před rokem 2500 před n.l.
Empiricky vyvinuté materiály	
Bronz	2500 před n.l.
Ocel	1500 před n.l.
Litina	1500
Materiály vyvinuté na základě kvalitativní analýzy vědeckých výsledků	
Slitiny hliníku	1910
Antikorozní austenitická ocel	1930
Plasty	1940
Slitiny titanu	1960
Mikrolegované oceli	1965
Materiály vyvinuté na základě kvalitativní analýzy vědeckých výsledků	
Polovodiče	1950
Monokrystalické slitiny niklu	1960
Kompozity	1965
Slitiny s tvarovou pamětí	1970
Kovová skla	1970
Řezná keramika	1980
Polovodiče s heterogenní strukturou	1990

(Zdroj: [11])

2.1 Obrobitelnost oceli

2.1.1 Oceli v závislosti na obsahu legujících prvků

- *Nelegované oceli*
- *Nízkolegované oceli*
- *Vysoce legované oceli*

Podíl legujících prvků a jejich složení v ocelových materiálech ovlivňuje vlastnosti a tyto prvky jsou záměrně přidávány (*síra, nikl, chrom a molybden, křemík, titan a vanad, mangan, fosfor, olovo*). Legující prvky ovlivňují obrábění, tvorbu nárustků, pevnost a kalitnost. Mají vliv na kvalitu povrchu, délku a tvar třísky.

U uhlíkových a nízkolegovaných ocelí ($C \leq 0,4 \%$) přídavek síry či olova usnadňuje vytvoření krátké třísky a snižuje řezné síly; frézy z rychlořezné oceli (*HSS*) nebo slinutých karbidů (*SK*) s nanesenými povlaky zde dosahují dlouhé životnosti. S rostoucím obsahem uhlíku a legur stoupá tvrdost i houževnatost, takže pro vysoce legované, žárupevné či kalené oceli jsou nutné *SK* s jemnozrnnou matricí, kubický nitrid boru (*CBN*) nebo keramické břity, často s negativním úhlem čela a nižší řeznou rychlostí. [9; 10]

2.1.2 Oceli v závislosti na obsahu uhlíku

Oceli na základě obsahu uhlíku ve struktuře rozdělujeme na *hypoetektoidní oceli* (obsah uhlíku $C < 0,8 \%$), *oceli s obsahem uhlíku v intervalu* $0,25 \% < C < 0,4 \%$ a *hypereutektické oceli* (obsah uhlíku $C > 0,8 \%$). [9; 10]

2.1.3 Oceli v závislosti na tepelném zpracování

Výsledkem tepelného zpracování by mělo být přizpůsobení změny mechanických vlastností a popř. přizpůsobení obrobitelnosti požadavkům. Závisí na aplikované metodě tepelného zpracování. [9; 10]

2.2 Obrobitelnost litiny

Obrobitelnost litiny (bílé litiny, temperované litiny, litiny s lamelovým grafitem, litiny s kuličkovým grafitem, litinové materiály *ADI*) je podmíněna množstvím a formou uloženého grafitu. Grafit narušuje kovovou základní strukturu, nicméně snižuje tření mezi nástrojem a obrobkem. Na rozdíl od ocelí je u litin lepší obrobitelnost – krátké třísky, nižší obráběcí síly, delší životnost nástroje.

Šedá litina s lamelovým grafitem se frézuje poměrně snadno – grafit lámavě narušuje matici a snižuje tření. Naopak tvrdá bílá litina a *ADI* obsahuje cementit či ausferritickou strukturu, která je extrémně abrazivní; zde se uplatňují *SiAlON*-keramika nebo *CBN*. [9; 10]

2.3 Obrobitelnost hliníku a hliníkových slitin

Díky pozitivním vlastnostem, jako je např. pevnost, lehkost, odolnost vůči korozi, snadná obrobitelnost, dobrá tepelná a elektrická vodivost, dobrá recyklovatelnost je hliník hojně používaným materiálem. Hliník rozdělujeme podle použití a složení na hliníkové materiály pro tváření, hliníkové materiály určené k odlévání, hypereutektické slévárenské slitiny *Al-Si* (obsah *Si* nad 12 %).

Hliníkové slitiny vynikají vysokým odvodem tepla, a proto dovolují extrémně vysoké řezné rychlosti a posuvy. Hypoeutektické *Al-Si* odlitky však obsahují tvrdé křemíkové krystaly zkracující životnost karbidových břitů; optimální jsou polykrystalické diamantové (*PKD*) frézy s leštěným čelem a beztrískovým chlazením. [9; 10]

2.4 Obrobitelnost mědi a měděných slitin

Měď se dělí do tří základních skupin obrobitelnosti, které určují daná kritéria (životnost nástroje, tvorba třísek, obráběcí síly, jakost povrchu). Skupiny jsou rozděleny podle indexu obrobitelnosti, které stanovil *Německý institut mědi (Deutsches Kupferinstitut)* a výrobci materiálů. Jedná se o míru produktivnosti, které lze dosáhnout s materiálem v sériové výrobě v přímém srovnání s jiným materiálem. Pro měď platí, že obrobitelnost se zlepšuje s vyšším obsahem *Pb*, *Te* či *S*. Čistá měď vytváří dlouhé nárůstky vyžadující ostré břity a řezný olej.

Skupina obrobitelnosti I – Materiály z této skupiny jsou velmi dobře obrobitelné. Řadí se sem materiály na bázi mědi s obsahem olova, telluru nebo síry s homogenní nebo heterogenní strukturou.

Skupina obrobitelnosti II – Materiály z této skupiny jsou dobře až středně dobře obrobitelné. Jedná se o materiály na bázi mědi s vyšší pevností a lepší tvářitelností za studena. Tyto materiály vytvářejí delší třísky.

Skupina obrobitelnosti III – Materiály z této skupiny jsou špatně obrobitelné, to má za následek tvorbu dlouhých, houževnatých třísek a vysoké opotřebení nástroje. Náležejí sem materiály na bázi mědi s homogenní strukturou. Materiály disponují dobrými vlastnostmi při tváření za studena. [9; 10]

2.5 Obrobitelnost titanu a jeho slitin

Titan se řadí k polokovům, je lehký téměř jako hliník, vysoce odolný proti korozi, má vysokou mechanickou pevnost. Protože výrobní postup je značně komplikovaný, je titan desetkrát dražší než běžná ocel. Nachází své použití v letectví, kosmonautice, armádě a lékařství.

Tento polokov se dělí na čistý titan a jeho slitiny (α titanové slitiny, β titanové slitiny a $\alpha + \beta$ titanové slitiny). Nejběžnějším titanovým materiálem je slitina *TiAl6V4*.

Při obrábění titanu se upřednostňuje sousledné frézování, obrábění by mělo být prováděno za nízkých řezných rychlostí, vhodná je aplikace chladicí kapaliny při obrábění, optimálního maziva v závislosti na metodě obrábění, optimalizace posuvu, eliminace vibrací, zajištění stabilního a spolehlivého upnutí obrobků.

Obrábění titanových slitin komplikuje nízká tepelná vodivost – až 70 % tepla zůstává v ostří. Frézy musí mít velmi tvrdý povlak (*AlTiN*, *TiB₂*), ostrý hřbet a pracovat s intenzivním vysokotlakým chlazením. Doporučeno je sousledné frézování s menší hloubkou řezu, aby se omezilo chvění. [9; 10]

2.6 Obrobitelnost polymerních materiálů

Monopol polymerních materiálů na poli automobilového, potravinářského či oděvního průmyslu je čím dál větší. To je způsobeno ekonomickým hlediskem (cena jednotlivých polymerů) nebo jejich vlastnostmi (tvářitelnost, tvrdost, elasticita, odolnost proti lomu, odolnost proti teplotě a změně tvaru při působení tepla, odolnost vůči chemickým látkám, nízká hustota). Obecně jsou plasty definovány jako makromolekulové látky, které lze formovat do požadovaného tvaru působením tepla nebo tlaku, popř. obou faktorů současně. Plasty lze aplikovat přímo (konstrukční aplikace) nebo nepřímo (povrchové úpravy, ochranné aplikace).

Rozdělení plastů

Polymery lze rozdělit principiálně na základě jejich fyzikálních vlastností na termoplasty, elastomery a reaktoplasty. Polymerní hmoty se rozdělují podle svého složení, z něho vyplývajících vlastností (amorfní, krystalické, syntetické, přírodní, transparentní, zakalené, usprádaní řetězců) a chování při zahřívání.

Často obráběnými skupinami jsou termoplasty a reaktoplasty. Termoplasty lze dále dělit na standardní plasty, konstrukční plasty (PMMA, PA) a vysoce výkonné plasty (PEEK, PTFE).

Obrobitelnost plastů

Polymerní hmoty jsou v porovnání s kovovými materiály snadněji obrobitelné. Plasty mají specifické chování plynoucí z materiálových vlastností. Kvůli špatné tepelné vodivosti a poměrně nízkým teplotám tavení většiny plastů je nutno brát zřetel na to, aby při obrábění vznikalo a na zpracováváný obrobek bylo přenášeno co možná nejméně tepla. Negacemi nadměrného tepelného namáhání plastu je třeba změna barvy, natavení povrchu, křivení. Eliminace těchto nepříznivých vlivů spočívá ve volbě nástroje. Břity nástrojů musí být vždy bez vad a dobře naostřené. Úhel hřbetu musí být dostatečně velký, aby na obrobek vždy doléhal pouze břit a minimalizovalo se tření. Důležitý je i odvod třísek, aby nedocházelo k zadržování tepla.

Nejčastěji se používají nástroje s břitovými destičkami ze slinutých karbidů nebo rychlořezné oceli. Nízká tvrdost neklade speciální nároky na kvalitu řezného materiálu. Je možné beze změny používat stejnou geometrii břitu jako při obrábění kovů či dřeva. Opotřebovávání řezných hran je sotva patrné a životnost je tedy prakticky neomezená. Používají se nástroje s menším počtem zubů (např. jeden, dva), což vede k větší zubové mezeře, po které se může odvádět více třísek.

Řezání závitů je bez potíží možné s běžnými nástroji. Nesmí se překročit úhel čela 0° . Otáčky závitů se však mohou při častém povolování šroubů poškodit. Pro zřídka uvolňované spoje se osvědčily závitořezné šrouby (ne šrouby do plechu).

U plastů je kritická tepelná citlivost: špatně odvádějí teplo a mohou měknout či natékat na břit. Často se používají pouze běžné chladicí kapaliny nebo vrtací emulze. Chladicí kapaliny se používají zpravidla pro odvod většího množství třísek (např. při vrtání či řezání závitů) nebo při velkém uvolňování tepla, kde zabráňují deformaci obrobku. U plastů, které mají sklon ke vzniku trhlin způsobených pnutí, jako je např. polykarbonát, je nutné používat k chlazení spíše vodu nebo stlačený vzduch. Při kryogenním chlazením se jako chladicí médium používá tekutý dusík. Uplatnění nalezne při obrábění vysoce výkonných termoplastů. Tato technologie zajišťuje přesné chlazení řezné zóny, což umožňuje čisté a bezotřepové obrábění polymerů často používaných v leteckém a lékařském průmyslu. Výsledkem chlazení tekutým dusíkem je zvýšená rozměrová přesnost a 20% zlepšení kvality

povrchové úpravy. Výhodou kryogenního chlazení tekutým dusíkem oproti jiným emulzím je dlouhodobá udržitelnost, protože dusík tvoří 78 % zemské atmosféry. [9; 10; 12]



Obrázek 6 Kryogenní chlazení pro přesné obrábění plastů

(Zdroj: [12])

2.7 Obrobitelnost hybridních materiálů

Pod názvem hybridní materiály se skrývají kompozitní materiály nebo kombinace materiálů, které jsou vyrobeny nebo spojeny z více jednotlivých složek do jednoho celku. Tyto materiály aplikujeme zejména tam, kde chceme snížit hmotnost výrobků a zároveň zvýšit výkonnost. U hybridních materiálů závisí mechanické vlastnosti na druhu zpevňovací složky (tj. složka, která určuje zvýšení pevnosti či tvrdosti) a na vlastnostech druhé složky – matrice, pojiva (složka zaručuje soudržnost materiálu). U kompozitních materiálů zesílených vlákny záleží mj. na druhu vlákna (polymerní, uhlíková), délce, průměru a chemickém složení vlákna, množství, směru kladení, počtu vrstev. Výhoda kompozitních materiálů zesílených vlákny tkví v možnosti vytvoření materiálu, který je vytvořen na míru uživatele a kryje jeho potřeby vhodným vložením vláken do matrice.

Obrábění těchto materiálů je obtížné (obzvlášť při hybridním spojení tří a více materiálů, př. *hliník-CFK-titan*), ne zřídka se místo třísek tvoří prach, u snadno obrobitelných materiálů v kombinaci s jiným materiálem se obrobitelnost hmoty změní (*hliník-titan*). Důležitý je i směr kladení vrstvy materiálu, jelikož při obrábění může být axiální tlak příčinou delaminace (rozdělení) jednotlivých vrstev na přechodu.

Kompozity (*GFK, CFK, MMC, sendvičové honeycomb*) kombinují tvrdá vlákna a měkkou matici; abrazivní charakter vyžaduje *PKD/CBN* ostří a pečlivé řízení směru frézování, aby nedocházelo k delaminaci vrstev.

Správná volba frézy – tedy kombinace materiálu břitu, počtu zubů, rádiusu ostří, úhlů čela a hřbetu i případného povlaku – musí respektovat právě popsané rozdíly v obrobiteľnosti. Jen tak lze minimalizovat řezné síly, teplo, tvorbu nárůstků a vibrací, čímž se prodlouží životnost nástroje, zvýší kvalita povrchu a sníží náklady na výrobu. [9; 10; 13]

2.8 Obrobiteľnost grafitu

Grafit může být přírodní nebo syntetický. Extrémně abrazivní, pouze s diamantovým povlakem *sp³* nebo *PKD*, *CVD*, možný vysoký posuv, nízké působení obráběcích sil. [10]

2.9 Obrobiteľnost dřeva

Obrábění dřeva má různé podoby – řezání, soustružení, frézování (čepů a rozporů, drážek, polodrážek, tvarových profilů, atd), dlabání, broušení, hoblování, pilování, škrábání aj. Obrábění je doporučeno provádět ve směru vláken, materiál neklade takový odpor a jakýkoliv odklon vyvolává obtíže.

Dřevo ve srovnání např. s kovy, polokovy nebo grafitem klade nižší řezný odbor a také opotřebení nástroje při obrábění je nižší. Nástroje jsou nejčastěji vyráběny z rychlořezné oceli nebo slinutých karbidů. Jsou často normalizovány, např. úhlové frézy používané na sražení hran atp. Frézy na drážky se vyrábějí v nejpoužívanějších šířkách drážky 4 až 16 mm. Frézy na srovnání boků se vyrábějí v šířkách 10 až 100 mm. Polodrážkovací frézy se používají ke srovnání boků. Počet jejich zubů se mění v závislosti na způsobu použití. [14; 15]



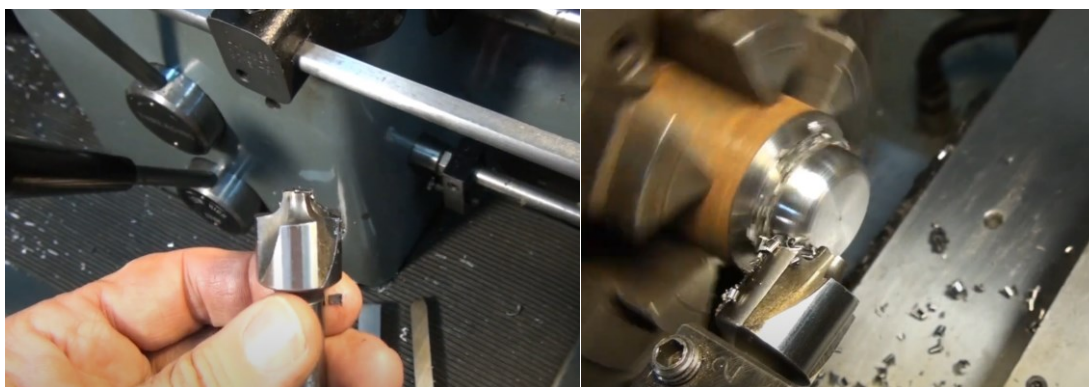
Obrázek 7 Frézování drážky (vlevo), frézy do dřeva

(Zdroj: [16], [17])

3 FRÉZY

Frézy jsou řezným rotačním nástrojem užívaným na frézkách. Těleso frézy je obvykle válcové, otáčí se kolem své osy a má většinou na obvodě stejnoměrně rozdělené zuby, zabírající postupně do materiálu. [18]

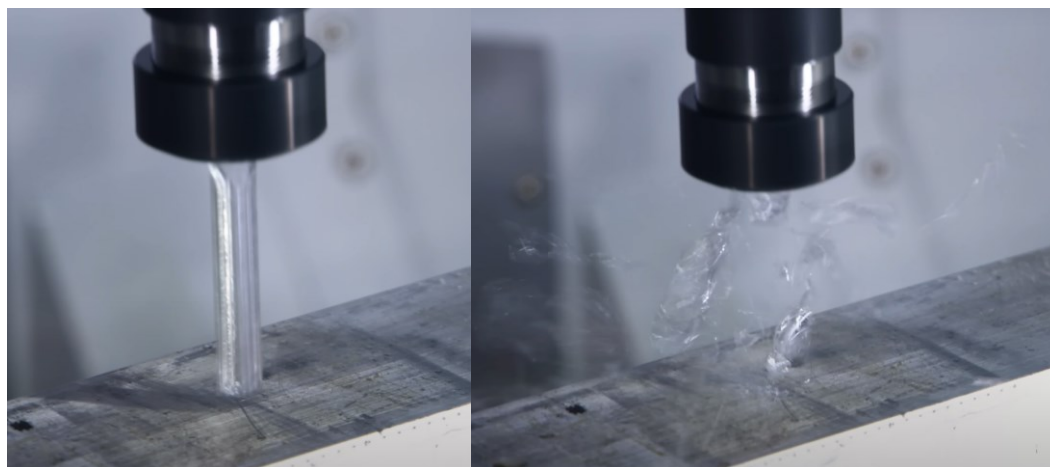
Na *obrázku 8* je patrné, že frézu lze upnout i do nožové hlavy soustruhu a určitým způsobem tvarovat obrobek. To je pro řezný nástroj nepříznivé, protože jsou po celou dobu cyklu v záběru pouze jedny a tytéž zuby a dochází k nerovnoměrnému opotřebení.



Obrázek 8 Použití tvarové frézy na soustruhu

(Zdroj: [19])

Všeobecně u všech obráběcích technik (např. soustružení a vrtání) se požaduje, aby nástroj byl vždy tvrdší než obrobek a současně houževnatý, nikoliv vice versa. Jak je patrné z *obrázku 9* fréza vyrobená ze skla neodebrala žádný materiál a při kontaktu s obrobkem došlo k okamžitému zničení nástroje.



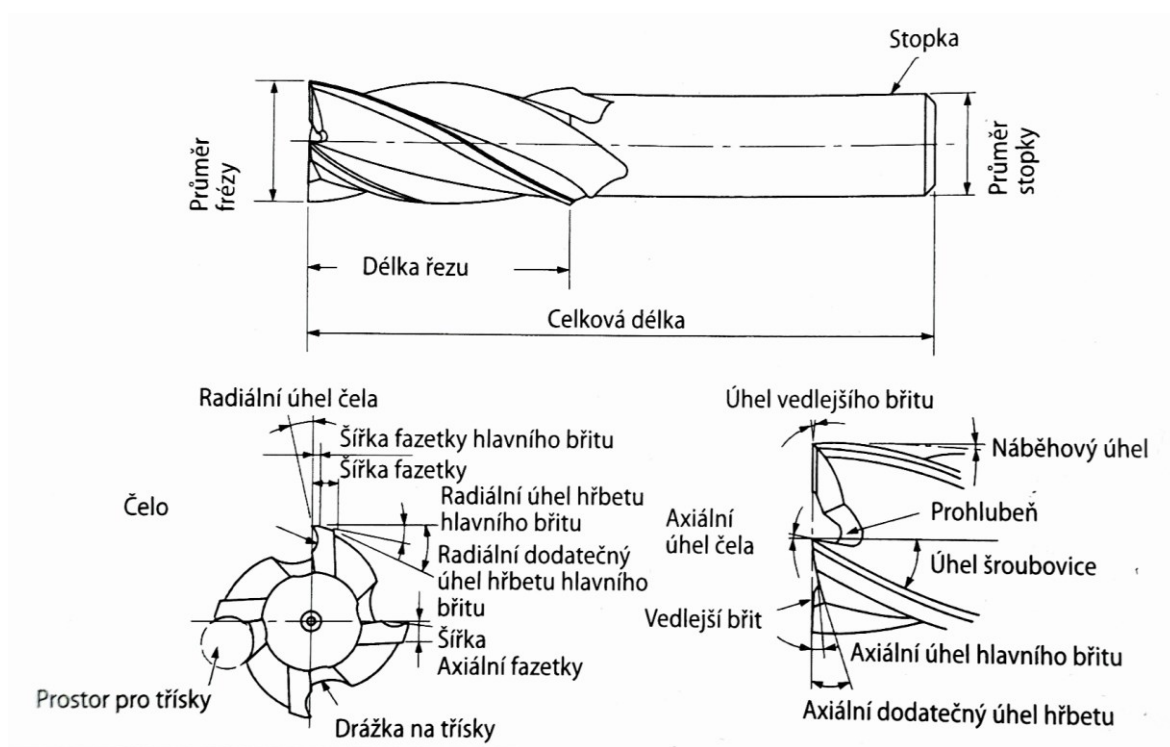
Obrázek 9 Skleněná fréza před dotykem s obrobkem (vlevo) a po dotyku (vpravo)

(Zdroj: [20])

3.1 Popis frézy

Fréza je soustava konstrukčních prvků, jejichž úlohou je řízeně odebrat materiál ve formě třísek. Konkrétní konfigurace těchto prvků vždy vychází z typu frézy, vlastností obráběného materiálu, zvoleného způsobu obrábění, hodnot posuvu a řezné rychlosti i dalších provozních podmínek.

Parametry, jako jsou geometrie řezných úhlů, počet zubů, volba řezného materiálu či povlaku, se opírají o dlouhodobé zkušenosti výrobců, firemní know-how a ověřená data z praxe. Jejich správná kombinace je nezbytná pro zvýšení řezné schopnosti nástroje, prodloužení jeho životnosti, minimalizaci řezných sil a dosažení požadované kvality obrobeného povrchu. Pro ilustraci: aby byl řez plynulý a povrch hladší, jsou zuby většiny fréz uspořádány ve šroubovici, která zajišťuje postupné zatěžování břitů a rovnoměrné odvádění třísek. [18]



Obrázek 10 Označení a pojmy u frézovacího nástroje

(Zdroj: [10])

3.1.1 Těleso frézy

Těleso je hlavní částí frézy. Je opatřeno zuby, které bývají buď z jednoho kusu s tělesem (celistvé frézy), nebo vsazené do tělesa frézy. Těleso může být opatřeno buď stopkou pro upnutí do vřetena stroje, nebo je v něm „otvor“ sloužící k upnutí na trn. [18]

3.1.2 Obvod frézy

Imaginární válcovou plochu obalující vnější hrany obvodových zubů a určující průměr frézy označujeme jako obvod frézy, osa obvodu je současně osou otáčení frézy. [18]

3.1.3 Průměr frézy

Průměr frézy je měřen na ostří. U válcových fréz se rovná průměr frézy průměru válce, tvořeného obvodem frézy. U čelních fréz je průměr měřen na ostří zubů na obvodu frézy. [18]

3.1.4 Boky, čelo, zadní strana a šířka frézy

Dvě rovnoběžné strany, kolmé k ose otáčení, tvoří boky obvodových fréz. Osová vzdálenost mezi boky určuje šířku frézy a současně největší možnou šířku řezu.

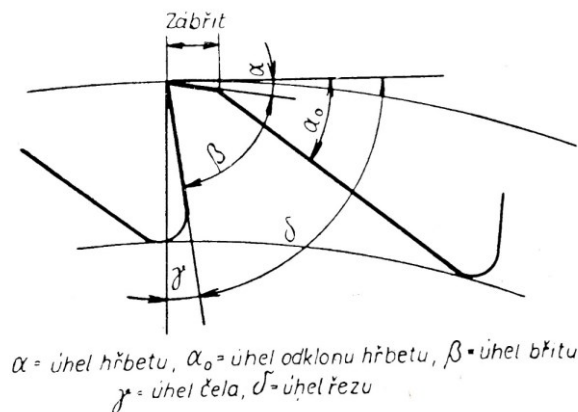
Čelo je plocha, z níž vyčnívá čelní ostří nožů. Zadní strana slouží k upevnění frézy na vřeteno nebo na trn. U nástrčných fréz se šířka frézy určuje od čela po zadní stranu. [18]

3.1.5 Čelo zubu

Čelo je zakončeno ostrím zubu a zároveň se jedná o plochu, na které při řezu dochází k tvorbě třísky. Bývá buď *ploché* (u válcových fréz s přímými zuby), nebo *zakřivené* (u fréz se šroubovitými zuby). [18]

3.1.6 Hřbet zubu

Hřbet zubu bývá buď *ploché* (např. u čelních fréz), nebo *zakřivený* (např. u tvarových fréz). Bývá také vytvořen kombinací několika rovných plošek, skloněných v různých úhlech (např. u válcových fréz se šroubovitými zuby). [18]



Obrázek 11 Označení úhlů fréz

(Zdroj: [18])

3.1.7 Úhel břitu

Úhel břitu (označovaný řeckým písmenem β) je sevřen čelem a zábřitem zubu frézy. Úhel břitu má být co možno největší, aby u ostří zubu bylo co největší množství kovu, čímž se dosáhne potřebné pevnosti zubu a lepšího rozptýlení vznikajícího tepla. [18]

3.1.8 Fazeta (zábřit)

Fazetou nazýváme úzkou plošku za ostřím, která vznikne úhlovým vychýlením části hřbetu zubu. Šířka fazety se odvíjí v závislosti na velikosti nástroje, pohybuje se v rozpětí desetin milimetru u fréz malého průměru až po jednotky milimetru u fréz většího průměru. [18]

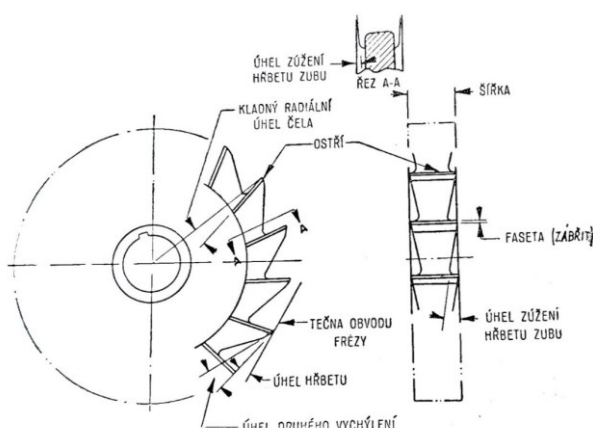
3.1.9 Úhel sklonu ostří (břitu) zubu

Úhlem sklonu ostří zubu je označení úhlu, sevřeného tečnou k ostří zubu a osou frézy. [18]

3.1.10 Ostří (břit)

Ostří jako jediný prvek nástroje přichází do styku s obráběným předmětem. Ostří je tvořeno průsečnicí plochy čela a hřbetu zubu. Ostří provádí vlastní řez a musí být proto ostré. Broušení prováděné za účelem dosažení požadované ostrosti břitu nazýváme ostření.

Obrys ostří se upravuje tak, aby odpovídal požadavkům příslušné frézovací operace. Tak například u obvodových fréz, tvarových bývá ostří upraveno tak, aby vyfrézovalo buď plochy, nebo nepravidelně zakřivený povrch. Ostří bývá vytvořeno buď jen na obvodě, anebo navíc na jedné nebo obou bočních stranách, jako je tomu u kotoučových oboustranných fréz. [18]



Obrázek 12 Názvosloví kotoučové oboustranné frézy

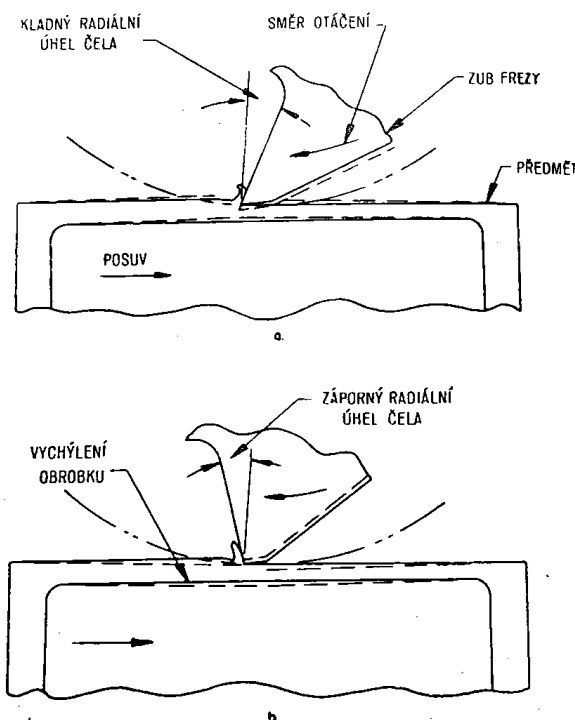
(Zdroj: [18])

3.1.11 Úhel čela

U *obvodových fréz* je úhel čela tzv. radiální, udává vyklonění čela zubu od poloměrové přímky vedené k ostří nože. U *čelních fréz* jsou zuby vykloněny radiálně i axiálně. Tyto úhly nazýváme radiálními a axiálními úhly čela.

Radiální nebo axiální úhly čela bývají buď kladné, nulové nebo záporné. Tyto pojmy se dají definovat takto:

- *Kladný úhel čela* – Úhel čela je kladný tehdy, je-li čelo zubu odkloněno dozadu od poloměrové přímky nebo osy frézy. U fréz z *RO* se upřednostňuje volba kladného úhlu čela, protože má pozitivní dopad na nástroj i obrobek. Dochází k lepšímu odvodu třísky podél čela zubu, ke zlepšení jakosti ofrézovaného povrchu, k prodloužení životnosti nástroje, snížení teploty vznikající na břitu.
- *Nulový úhel čela* – Stojí-li čelo zubu ve směru poloměrové přímky nebo osy frézy, mluvíme o nulovém úhlu čela.
- *Záporný úhel čela* – Jestliže je čelo nakloněno kupředu od poloměrové přímky nebo osy frézy, je úhel čela záporný. [18]



Obrázek 13 Vliv kladného a záporného úhlu čela při frézování tenkostěnných součástí

(Zdroj: [18])

Tabulka 2 Úhly čela zubů čelních fréz při rozličných řezných i obráběných materiálech

Obráběný materiál	Řezný materiál					
	rychlořezná ocel		litý neželezný řezný materiál		slnutý karbid	
	úhel čela		úhel čela		úhel čela	
	radiální	axiální	radiální	axiální	radiální	axiální
Měkká litina	10°-15°	10°-15°	6°-8°	6°-8°	3°-6°	3°-6°
Měkká ocel	10°-15°	10°-15°	3°-6°	3°-6°	0°-(-5°)	0°-(-5°)
Tvrdá litina	10°	10°	3°-6°	3°-6°	0°-3°	0°-3°
Tvrdá slitinová ocel	10°	10°	0°-3°	0°-3°	0°-(-10°)	0°-(-10°)
Hliník a jeho slitiny	20°-35°	20°-35°	10°-15°	10°-15°	10°-20°	10°-20°
Hořčík a jeho slitiny	20°-35°	20°-35°	15°-25°	15°-25°	15°-25°	15°-25°
Mosaz a bronz	10°	10°	5°	5°	3°	3°

(Zdroj: [18])

3.1.12 Úhel hřbetu

Úhel hřbetu je sevřen fazetou a tečnou k obvodové kružnici v bodě ostří zubu frézy. Tento úhel má za cíl zabránit tomu, aby nedošlo ke styku fasety zubu a frézovaného povrchu předmětu. Pokud dojde opotřebení nástroje do té míry, že úhel hřbetu zmizí, nastává tření mezi fazetou a frézovaným povrchem. Následkem je zhoršení jakosti obrobku a snížení řezného účinku nástroje, zvýšení hluku při obrábění. Úhel hřbetu je vždy kladný. Volba tohoto úhlu dále závisí na druhu obráběného materiálu a obráběcí operace. Správná volba se značně propíše do trvanlivosti ostří nástroje a má vliv na dobrý řezný účinek frézy. Je doporučováno, aby úhel hřbetu byl volen vždy co nejmenší. To vede k zůstatku většího množství kovu na břitě, čímž se dosáhne lepšího rozptýlení tepla a velké pevnosti ostří. Naopak velké úhly často vedou k „drnčení“ nástroje, které se projeví špatnou jakostí obrobeného povrchu a snížené trvanlivosti frézy. U některých fréz (např. oboustranné kotoučové frézy, čelní frézy a okružní pily na kov) je možné provést modifikaci ve formě radiálního zbroušení, která vede ke snížení tření. [18]

Tabulka 3 Úhly hřbetu pro rozdílné druhy frézovaných materiálů

Frézovaný materiál	Úhel hřbetu
Ocel s malým obsahem uhlíku	3° - 5°
Vysokouhlíkové a slitinové oceli	3° - 5°
Litina	4° - 7°
Střední a tvrdý bronz	4° - 7°
Mosaz a měkký bronz	10° - 12°
Hliník, hořčík, umělé hmoty apod.	10° - 12°

(Zdroj: [18])

3.1.13 Počet zubů a zubová drážka

Zuby fréz jsou od sebe většinou stejnoměrně vzdáleny a vystupují z tělesa frézy buď radiálně, jako je tomu u fréz se šroubovitými zuby, tak i axiálně, jako je tomu u čelních fréz. Zuby tvoří s tělesem frézy buď nedílný celek (frézy celistvé), nebo bývají s tělesem frézy spjaty rozebíratelně (frézy s vyměnitelnými zuby, respektive frézy s *VBD*).

U celistvých fréz se ta část zubu, která vystupuje z tělesa frézy, nazývá kořenem zubu. Přední část zubu se nazývá čelem a zadní část hřbetem. Mezera mezi čelem jednoho a hřbetem předcházejícího zubu se nazývá zubová drážka a tvoří prostor pro vývin třísky. Tato drážka se mění a u každého nástroje nabývá odlišných hodnot, protože je v přímém vztahu s průměrem frézy a počet zubů. Jinými slovy, velký počet zubů zmenší zubovou drážku a vice versa, analogicky velká zubová drážka vyžaduje menšího počtu zubů. U návrhu drážky máme za cíl splnit tyto dva atributy správný tvar zubové drážky a dostatečně velký prostor pro vývin a volný odchod třísek. Při dodržení je dosaženo k přispění pozitivního řezného účinku frézy.

Zubové drážky nemají být úzké a mělo by se vyvarovat ostrým rohům. Dno drážky u paty zubu má být zaobleno v dostatečně velkém poloměru a úhel mezi zuby má být, pokud možno velký, aby odchod třísky byl plynulý a nenastávalo zanášení frézy nebo vzpříčení třísek.

Počet zubů frézy stanovuje materiál, jenž má být obráběn. Nelze jednoznačně říci, že konkrétní obráběný materiál má stanovenou frézu s ukotveným počtem zubů. [18]



Obrázek 14 Stopkové frézy, dvouzubá (nahore), šestizubá (dole)

(Zdroj: [21], [22])

3.2 Rozdělení fréz

Frézy se zhotovují v mnoha druzích a velikostech jsou určeny pro frézování, jak pravidelných (rovných), tak i nepravidelných (zborcených) ploch předmětu. Mohou obsahovat vnitřní chlazení, či disponovat povrchovou úpravou. Jejich geometrie a konstrukce je odlišná a liší se podle způsobu použití. Disponují různým počtem zubů, např. od jednozubých pro obrábění plastu až po ty mnohozubé. Můžeme je následně dělit takto: [10; 18]

3.2.1 Podle způsobu upínání

Velice snadné hledisko dělení fréz, rozpoznatelné na první pohled. Nástroje bývají buď nástrčné, nebo se stopkou.

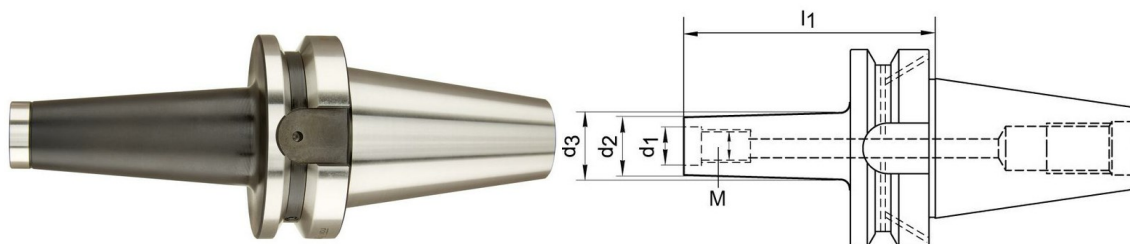
Jeden typ fréz může být různě proveden – může být válcová fréza nástrčná, též i válcová fréza se stopkou atp. [10; 18]

3.2.1.1 Stopkové

Frézy jsou ve spojení se strojem, pomocí kleštinových upínačů, do kterých je pevně upnuta stopka (stopková fréza s válcovou stopkou) nebo jsou uloženy přímo do dutiny vřetena za pomoci redukčních pouzder (stopková fréza s kuželovou stopkou). Pro frézy, na nichž je zhotoven závit, je vyvinut speciální upínač. Pokud nástroj má na držáku vyfrézovanou plošku, mluvíme o upínání *Weldon* fréza je za aretována k upínači prostřednictvím šroubu.

U fréz se stopkou jsme schopni snadno určit směr šroubovice a řezu, natočením stopky nástroje směrem k pozorovateli pozorujeme, zda šroubovice a ostří frézy stoupá doprava nebo doleva. Jestliže šroubovice stoupá doprava, je pravá, stoupá-li doleva, je levá. To platí

i pro určení směru řezu. Jestliže je ostří na pravé straně, je fréza pravořezná, je-li ostří na levé straně, je to fréza levořezná. [4; 10; 18]



Obrázek 15 Trn pro frézy se závitem

(Zdroj: [23])

- **Válcová stopka**

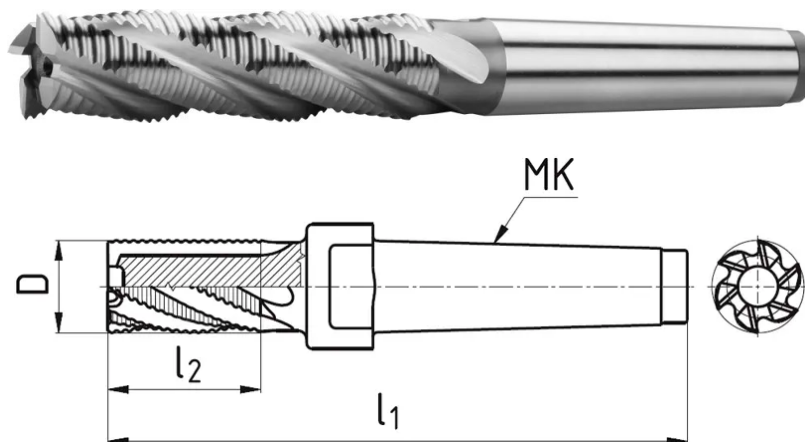
Válcové stopky mohou být hladké nebo se zářezem, který slouží jako upínací prvek.



Obrázek 16 Stopková fréza s VBD (vlevo), fréza kopírovací kuželová (vpravo)

(Zdroj: [24], [25])

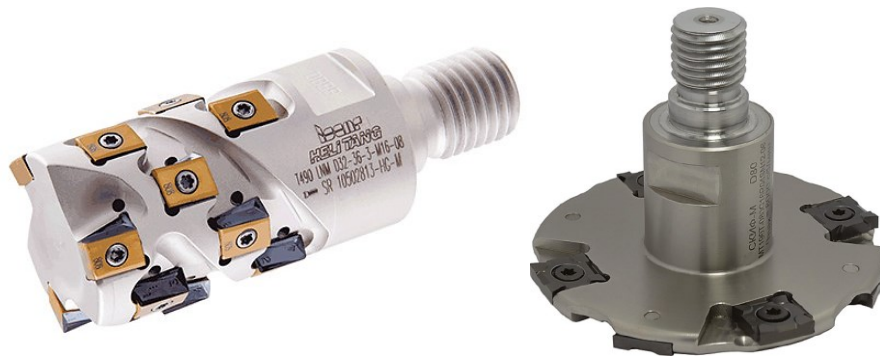
- **Kuželová stopka**



Obrázek 17 Frézy válcové čelní krátké, kuželová stopka Morse typ NR (nahore), tatáž fréza zobrazená schématicky (dole)

(Zdroj: [26])

- *Stopky se závitem*



Obrázek 18 Frézy se závitem

(Zdroj: [27], [28])

- *Frézy na strmém kuželu ISO*



Obrázek 19 Fréza kopírovací válcová čelní (vlevo), válcová fréza s břity ve šroubovici (vpravo)

(Zdroj: [29], [30])

3.2.1.2 Nástrčné

Nástrčné frézy jsou konstruovány pro upnutí na trn. Rozdělujeme dva typy trnů, a to dlouhé a krátké. Dlouhé trny jsou vloženy do vřetena stroje, styku fréz mezi sebou zabráňují distanční kroužky. Krátké trny slouží k čelnímu frézování. Nástrčné frézy jsou zhotovovány buď s pravou, nebo levou šroubovicí. Směr stoupání šroubovice nemá vliv na to, zda jsou frézy pravořezné nebo levořezné, záleží na nasazení na trn. Obrácením polohy frézy na trnu se změní i směr řezu. Nástrčné frézy s rovnými zuby lze použít pro oba směry řezu. Vyrábí se v mnoha provedeních, zde je vyjmenováno několik základních. [18]

- **Válcové frézy**

Jejich zuby jsou uspořádány pouze na obvodu válcové plochy. Těchto nástrojů se užívá ke frézování ploch rovnoběžných s osou vřetena. Vyrábějí se v nejrůznějších průměrech a šířkách. Ve starší literatuře se můžeme setkat s pojmenováním lehké válcové frézy a těžké válcové frézy, toto uvedené rozdělení je převzato z USA. U nás se používá pojmenování jemnozubé frézy pro lehké frézy a hrubozubé frézy pro těžké frézy. [18]

Válcové frézy se dále rozdělují do těchto skupin:

- a) *Hrubozubé*

Menší počet zubů vytváří širší zubní mezeru, vzniká dostatečný prostor pro vývin třísky a také lepší oporu řezné hrany.

- b) *Polohrubozubá*

Jedná se o kompromis mezi frézou hrubozubou a jemnozubou.

- c) *Jemnozubé*

Větší počet zubů, vzniká nedostatečný prostor pro vývin třísky. Aplikuje se většinou na dokončovací práce.

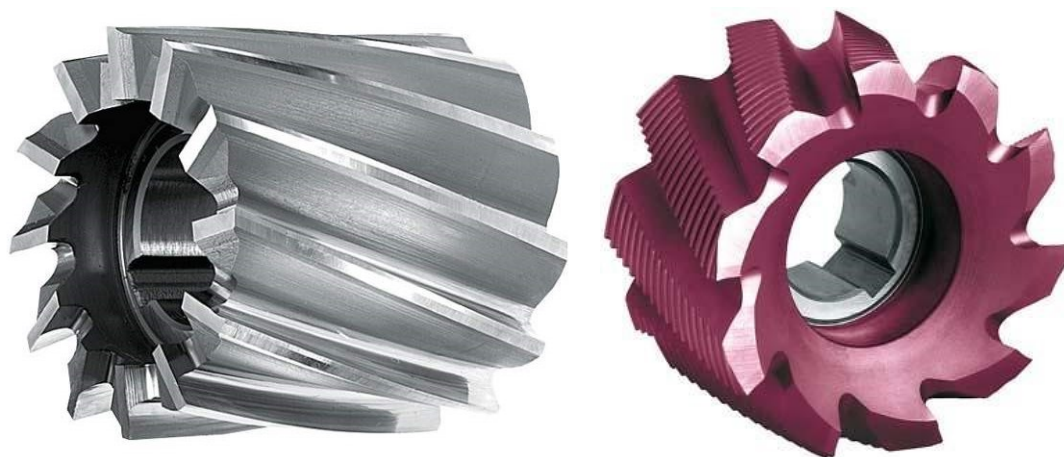


Obrázek 20 Fréza válcová nástrčná jemnozubá se zuby v levé šroubovici

(Zdroj: [31])

- **Čelní válcové frézy**

Oproti válcovým frézám jako takovým mají čelní válcové frézy bříty na jedné čelní ploše, jinak konstrukce je dosti podobná (obsahují bříty na obvodu válcové plochy). Kromě nástrčných válcových čelních fréz, mají všechny druhy těchto fréz stopku. Těchto fréz se užívá pro frézování ploch, profilů. [18]



Obrázek 21 Fréza válcová čelní nástrčná, jemnozubá (vlevo) a válcová čelní fréza DIN1880 HSS-Co8 s povlakem TiAlN (vpravo)

(Zdroj: [32], [33])

- **Kotoučové frézy**

Na rozdíl od válcových fréz mají kotoučové frézy zuby na obvodu válcové plochy a také na jednom nebo na obou čelech. Nasazují se na trn. Tyto frézy se vyrábějí v několika druzích:

- a) *Frézy jednostranné*

Mají břity na obvodu válcové plochy a na jednom čele. Hodí se pro plošné frézování v těch případech, kde je zapotřebí, aby řezala pouze jedna čelní strana frézy. Odběr materiálu se provádí obvykle obvodovým ostřím, zatímco čelního ostří se užívá k začistění a dokončení ofrézované plochy.



Obrázek 22 Kotoučové frézy s jednostranně zesílenou přírubou

(Zdroj: [34])

b) Frézy oboustranné

Jsou poměrně úzké a mají zuby na obvodu válcové plochy a na obou čelech. Hodí se pro oboustranné frézování, tj. frézování dvou protilehlých rovnoběžných ploch současně a pro frézování drážek.



Obrázek 23 Kotoučová fréza oboustranná s VBD

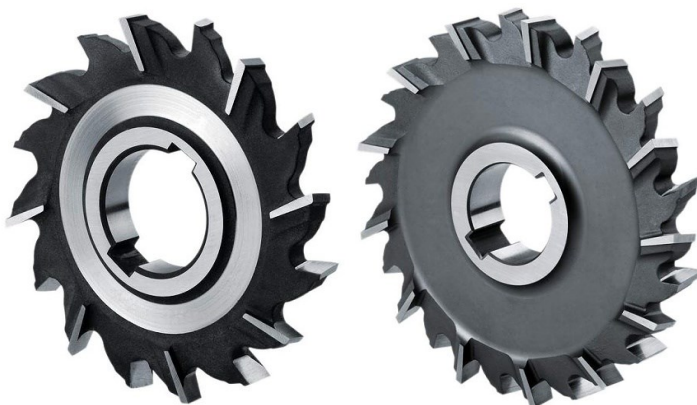
(Zdroj: [35])

c) Dělené nastavitelné frézy se západkovými zuby

Skládají se ze dvou oboustranných kotoučových fréz. U těchto fréz lze vložením kroužků nebo jiných vložek („mezikusů“) nastavovat šířku, případně vyrovnávat rozměrové úchytky.

d) Frézy se střídavými zuby

Jedná se o úzké kotoučové frézy, jejichž zuby mají pravidelně vystřídáný směr šroubovice. Frézy se střídavými zuby jsou výhodné pro řezání klínových a jiných drážek (hlubokých, širokých). Šířka normální frézy se střídavými zuby se mění opotřebením a každým naostřením, což pozmění i šířku drážky. [10; 18; 36]



Obrázek 24 Fréza kotoučová DIN885 HSSE polohrubozubá (vlevo) a jemnozubá (vpravo)

(Zdroj: [37], [38])

- *Úhlové frézy*

Oproti válcovým frézám tvar kotouče těchto fréz nabývá konického průřezu. Používají se k frézování rybinových, jemných a jiných drážek. Zhotovují se ve dvou provedeních:

a) Jednostranné úhlové frézy

Zubové břity jsou skloněny kuželovitě na jednu stranu, obvykle v úhlu 45° nebo 60° (běžně se prodávají s úhlem 50° , 55° , 65° , 70° atd.) měřeném od čela frézy. Nezřídka břity frézy kromě obvodu zasahují i do čela.



Obrázek 25 Úhlová čelní fréza jednostranná

(Zdroj: [39])

b) Oboustranné úhlové frézy

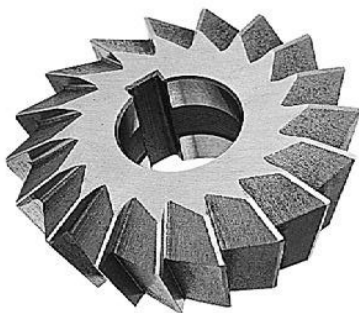
Zubové břity jsou skloněny kuželovitě na obě strany ve tvaru „V“, přičemž úhly kuželů, jakož i jejich velikosti, bývají různé. Zhotovují se obvykle v úhlech 45° , 60° nebo 90° . [18; 36]



Obrázek 26 Úhlová fréza oboustranná, souměrná

(Zdroj: [40])

Úhlové frézy kotoučové oboustranné nástrčné mají uspořádání zubů souměrné nebo nesouměrné.



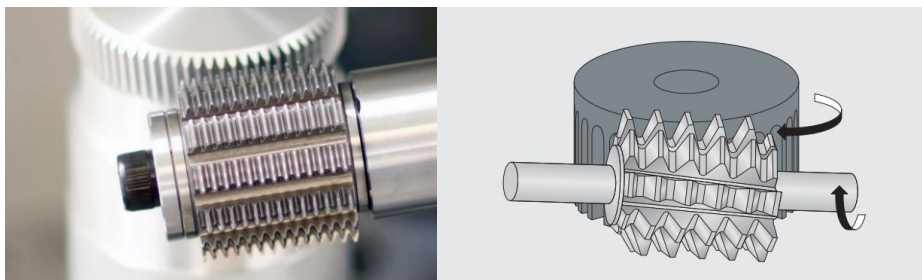
Obrázek 27 Fréza úhlová oboustranná, nesouměrná – úhel 85°

(Zdroj: [41])

- **Tvarové frézy**

Tvarové frézy definují rozličné tvary obrobků zakřiveným zubním obrysem. Drážkovací a úhlové frézy lze zahrnout do skupiny tvarových fréz.

Mezi tvarové frézy patří i frézy na ozubení, jež nazýváme „*modulové*“, dále frézy na řetězová kola, vypouklé (konvexní) a vyduté (konkávní) frézy stvořené na výrobu rádiusových ploch, zaoblovací frézy, frézy na drážky drážkových hřídelů, závitové frézy, odvalovací frézy a mnoho jiných fréz, jejichž použití je všeobecně rozšířeno, takže se vyrábějí v normalizovaných rozměrech. [18; 42; 43; 44]



Obrázek 28 Modulová fréza pro přímé vnější ozubení

(Zdroj: [45], [46])



Obrázek 29 Výroba vnitřního a vnějšího ozubení tvarovou nástrčnou frézou

(Zdroj: [43], [44])



Obrázek 30 Fréza čtvrtkruhová konkávní (vlevo), půlkruhová konkávní (uprostřed), půlkruhová konvexní (vpravo)

(Zdroj: [47], [48], [49])

3.2.2 Podle tvaru a ploch, na nichž leží břity

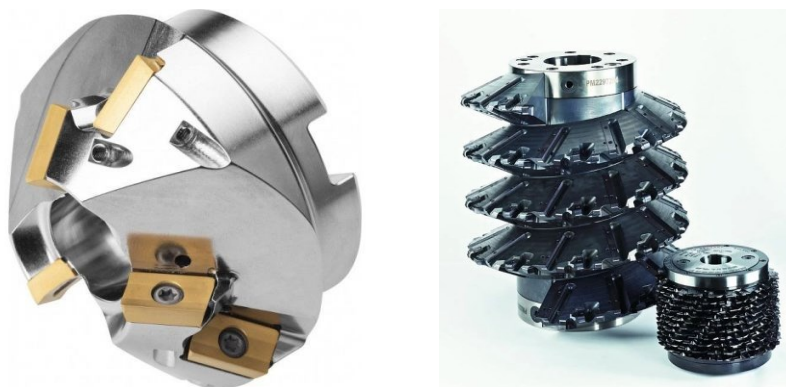
Do tohoto rozřazení zahrnujeme všechny frézy, analogicky všechny řezné nástroje obsahující, břity jinak by nebyly schopny odebírat třísku. [36; 42]

Spadají sem válcové frézy, čelní válcové frézy, rádiusové frézy, úhlové frézy, kotoučové frézy atd.



Obrázek 31 Fréza válcová čelní dlouhá s 1 břitem přes střed (vlevo), technická fréza tvrdokovová eliptická typ E (vpravo)

(Zdroj: [50], [51])



Obrázek 32 Fréza pro frézování úkosů (vlevo), tvarové frézy (vpravo)

(Zdroj: [52], [53])

3.2.3 Podle směru břitu a směru šroubovice

Směr řezu zjistíme, podíváme-li se na frézu upnutou ve frézce směrem od vřetená. Dělíme je na:

- a) *Pravořezné* – fréza vyžaduje otáčení vřetená ve směru hodinových ručiček.
- b) *Levořezné* – fréza vykonává rotační pohyb proti směru hodinových ručiček.

Podle toho mluvíme pak o pravém nebo levém řezu. Další dělení je možné podle uspořádání břitů na nástroji:

- *Frézy s břitů přímými*
- *Frézy s břitů šikmými*
- *Frézy s břitů šroubovitými*
- *Frézy se střídavými břitů*

Směr stoupání šroubovice určíme pohledem na zuby nebo zubové drážky frézy od vřetená. Stoupají-li zuby doprava, je směr šroubovice pravý, stoupají-li doleva, je směr šroubovice levý. [18]

3.2.4 Podle počtu zubů

U tohoto rozdělení je nutné vzít v úvahu počet zubů vzhledem k úměře na průměr nástroje. Frézy hrubozubé mají zuby masivní, větší zubovou mezeru, lépe odvádí třísku, jsou používány na hrubovací operace. Jemnozubé nástroje používáme zásadně na dokončovací operace, mají menší zubovou mezeru. [18]

- a) *Hrubozubé*
- b) *Polohrubozubé*
- c) *Jemnozubé*

3.2.5 Podle konstrukce

Frézy dělené dle konstrukce lze rozdělit do dvou základních skupin, jsou to buďto celistvé, nebo s vyměnitelnými zuby. Zároveň lze nástroje dělit na frézy zhotovené z několika částí spojené v jeden celek, popř. několik emancipovaných fréz uložených na jednom trnu. Frézy mohou obsahovat kanál vedený přes těleso nástroje, jímž proudí chladicí kapalina. Řezné

nástroje mohou zastávat hned několik operací. Nástroje lze konstruovat i ve velmi malém měřítku a v různých tvarech. [18]

3.2.5.1 Celistvé frézy

Zuby celistvých fréz tvoří s tělesem frézy jeden celek.



Obrázek 33 Stopková fréza s geometrií určenou pro obrábění uhlíkových vláken a sklolaminátu

(Zdroj: [54])

3.2.5.2 Frézy s vyměnitelnými zuby

Zuby jsou vsazeny do příslušných zářezů nebo otvorů v tělese frézy, v nichž jsou vhodným mechanickým způsobem upevněny – svařované, tvářené, broušené, pájené, přišroubované. [18]



Obrázek 34 Tvarová fréza do dřeva s vyměnitelnými břity

(Zdroj: [55])



Obrázek 35 Fréza s destičkami ze slinutého karbidu, natvrdo připájenými

(Zdroj: [56])

Nástroje s VBD

Vyměnitelná břitová destička (VBD), jak název vypovídá, je destičkou nesoucí řezný břit, vyráběná v různých tvarech a v různém složení v závislosti na požadované operaci. Je upnuta do tělesa obráběcího nástroje. Destičky jsou prodávány jednotlivě nebo v sadách. Stejně jako samotné nástroje mohou být ještě povrchově ošetřeny povlakem. [9; 10; 42; 57]



Obrázek 36 Nabídka rozličných typů vyměnitelných břitových destiček

(Zdroj: [57])



Obrázek 37 Sada vyměnitelných břitových destiček 06 IR M ISO BMA, Carmex

(Zdroj: [58])

Vyměnitelné břitové destičky se vyrábějí z rychlořezné oceli, ze slinutého karbidu (*nepovlakované, povlakované, armované* – těleso ze slinutého karbidu je osazeno břity z vysoce tvrdých materiálů (CBN nebo PKD)), nebo z řezné keramiky (z čisté keramiky, z cermetu).



Obrázek 38 Břitová destička ze slinutého karbidu

(Zdroj: [59])

Frézy s *VBD* mohou vypadat odlišně podle závislosti na tvaru nástroje (kotoučové, rohové, kulové), podle použití (výroba závitů, zápichů a drážek, pro sražení hran), podle tvaru zubové drážky (s břity ve šroubovici nebo přímou zubovou drážkou). Další dělení může nastat podle obráběného materiálu (frézování slitin hliníku, litiny frézami s *VBD* atd.).



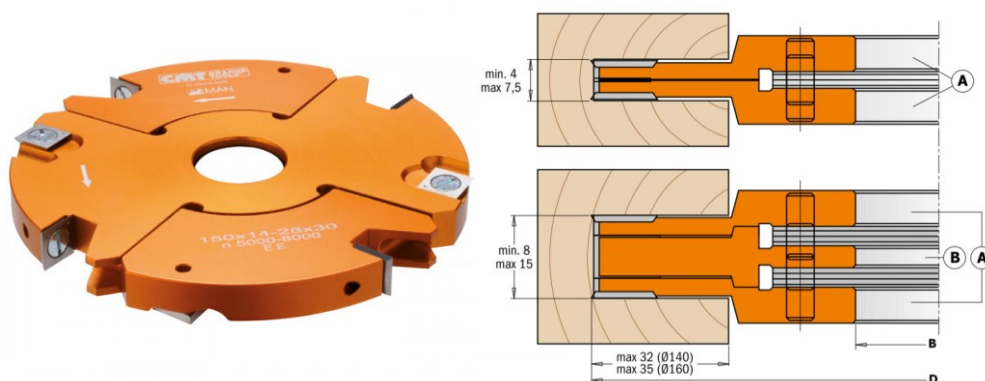
Obrázek 39 Stopková fréza s VBD ve šroubovici

(Zdroj: [60])

Tyto úpravy se provádějí za účelem snížení pořizovacích i udržovacích nákladů. Těleso nástroje je tvořeno levnějším materiálem (často z levné oceli). Do tělesa se vytvoří zářezy nebo drážky pro vsazení zubů (nožů). Zuby jsou vyrobeny z odolnějších, pevnějších, ale i dražších materiálů. Po opotřebení se vymění a nahradí novými. Tento druh konstrukce je obvyklý převážně u velkých fréz. [18]

3.2.5.3 Dělené frézy, frézy s nastavitelnými zuby

Jsou vyrobeny ze dvou nebo několika dílů složených do jednoho celku, tímto definujeme tvar, případně lze upravovat velikost. Tento druh fréz se ujal zejména u frézování dřeva. [61]



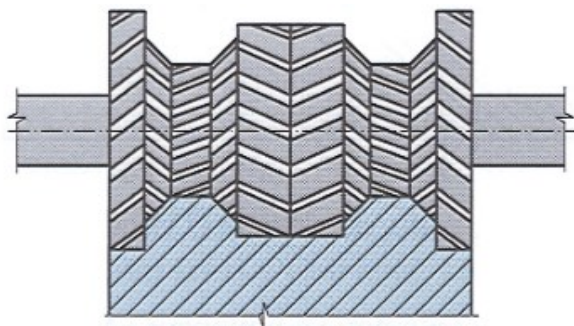
Obrázek 40 Nastavitelná fréza

(Zdroj: [61])

3.2.5.4 Složené frézy

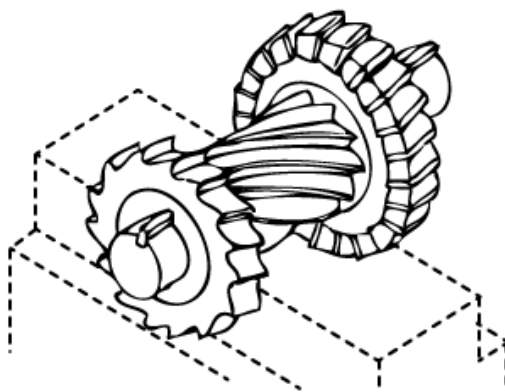
Jsou sestaveny z několika jednoduchých fréz umístěných a upnutých vedle sebe na společném trnu. Frézy vytvoří profil frézované tvarové plochy. Pokud se jedná o jednoduchý složený tvar, který je umístěný na povrchu obrobku, složením jednotlivých fréz předejdeme výrobou speciálního tvarového nástroje nebo zkrátíme výrobní čas (předejdeme použití více fréz různých průměrů).

Na *obrázku 41* je vidět hned několik fréz (nástrčných válcových a úhlových) naskládaných za sebou na trnu. Ostří fréz není v jednom směru. Takto poskládané frézy nám definují konečný tvar obrobku (obrys vybarvený modře se šrafování). [18; 42]



Obrázek 41 Složené frézy

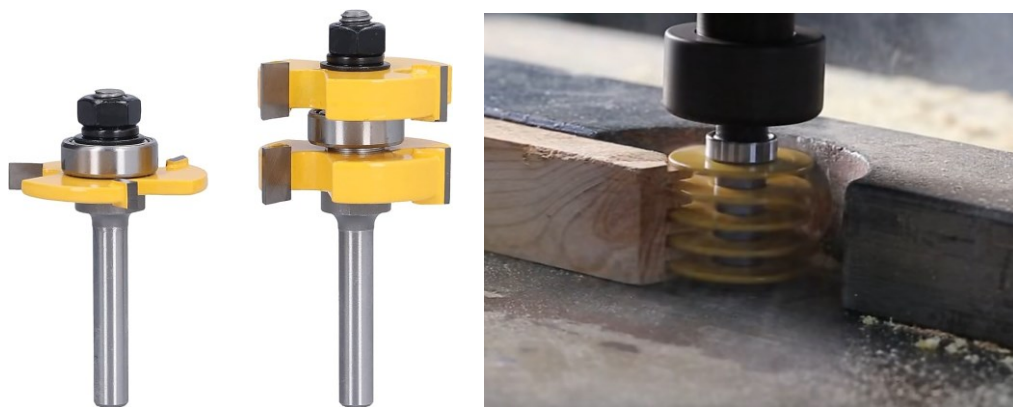
(Zdroj: [62])



Obrázek 42 Složené frézy

(Zdroj: [63])

Také lze skládat na stopku více čepelí s břity, a tak frézovat profil s více drážkami s požadovanou roztečí.



Obrázek 43 Nastavitelná fréza

(Zdroj: [64], [65])

3.2.5.5 Frézy bez vnitřního chlazení

Tyto frézy jsou při obrábění kovových obrobků chlazeny, ale externě, aby nedocházelo k přehřívání a s tím spjatému předčasnému opotřebení bříty. Nástroje jako takové nedisponují chladicím kanálkem, který zajišťuje přívod kapaliny do místa řezu. V technické praxi používají výrobní společnosti například flexibilní hadice, ze kterých prýští proud chladicí kapaliny na řezný nástroj. Tento typ chlazení, nazývaný záplavové nebo nárazové chlazení, má nevýhodu v tom, že spotřeba chladicí kapaliny je velmi vysoká a chlazení není příliš účinné. Je to proto, že místo, kde vzniká teplo, totiž samotná řezná hrana, je pouze sporadicky zásobováno chladicí tekutinou. Odletující anebo usazené třísky na řezném nástroji mohou vychylovat proud chladicí kapaliny a zhoršovat chlazení řezné hrany. Při frézování velmi úzkých nebo hlubokých drážek se může dokonce stát, že se přívod chladicí kapaliny k bříty téměř zastaví, jelikož přívod blokuje samotný frézovací nástroj. [9; 10]



Obrázek 44 Stopková fréza bez vnitřního chlazení

(Zdroj: [66])

3.2.5.6 Frézy s vnitřním chlazením

Obsahují chladicí kanál, teplota nástroje je snižována proudícím chladicím médiem vně nástroje, dochází k zmírnění opotřebení nástroje. Používáme je tam, kde se tato modifikace vyplatí, převážně v sériové a velkosériové výrobě, nebo tam, kde potřebujeme odvádět velké množství třísek. Průměr a tvar kanálku udává výrobce v technických listech. Kanálky jsou přímé nebo ve šroubovici, jsou odstupňovány podle průměru polotovaru. [9; 67]

Kromě centrálního kanálku lze vyrábět frézy s kanálky vyvedenými do zubové drážky, což je složitější na seřízení stroje.



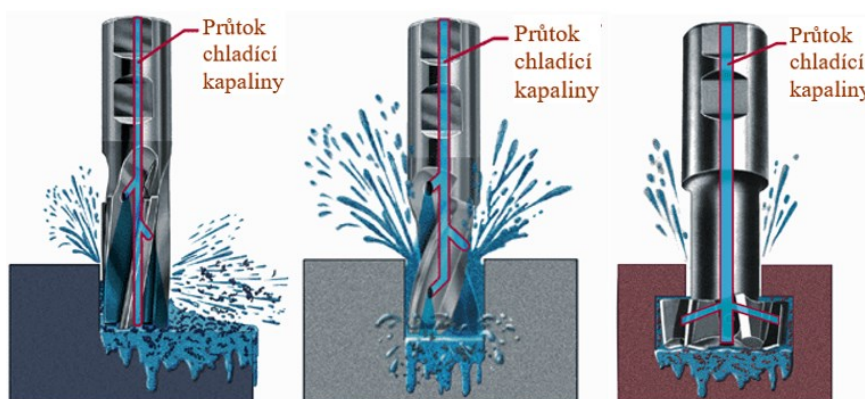
Obrázek 45 Stopková fréza s centrálním chlazením určená pro frézování závitů

(Zdroj: [68])



Obrázek 46 Stopková fréza, povlakovaná, čtyřzubá, s vnitřním chlazením

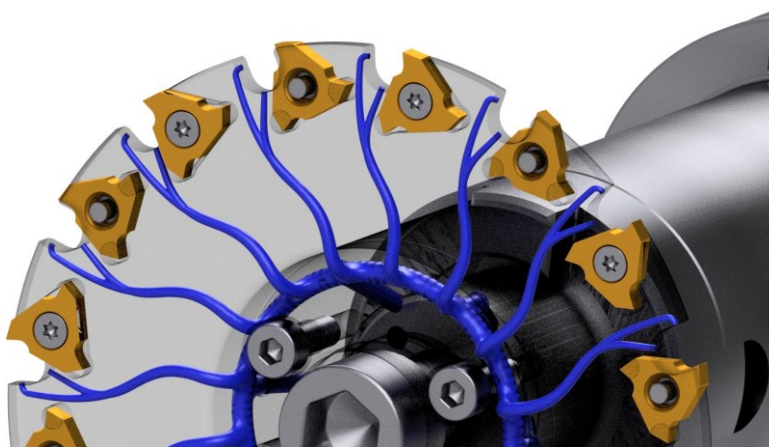
(Zdroj: [69])



Obrázek 47 Boční frézování (vlevo), frézování drážek (uprostřed) a T-drážek (vpravo)

(Zdroj: [67])

Dalším způsobem, jak přivádět kapalinu k místu řezu, je výroba fréz aditivními technologiemi. Nástroje tištěné z kovu s optimalizovaným chlazením s integrovaným přívodem chladicí kapaliny vykazovaly o více než 60 % delší životnost břitových destiček ve srovnání s konvenčním chlazením. To zvyšuje efektivitu a snižuje provozní náklady při obrábění.



Obrázek 48 Kotoučová fréza vyrobená aditivními technologiemi

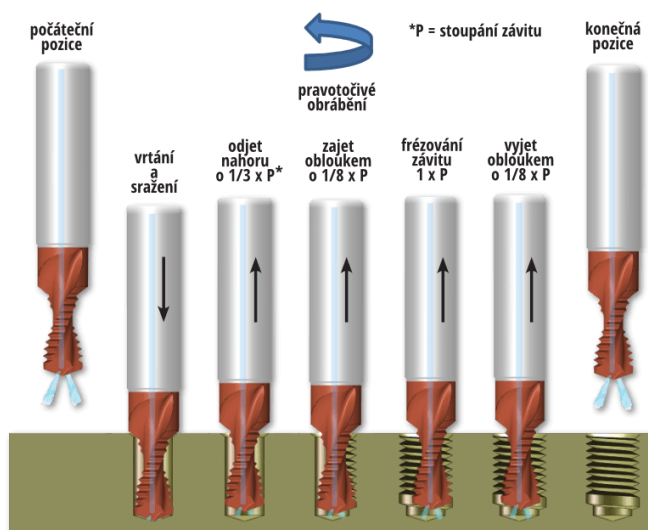
(Zdroj: [70])

Pro zajištění cíleného přívodu chladicí kapaliny k břitovým destičkám jsou nutné vnitřní, proudově optimalizované kanálové struktury s požadovanou přesností. Četné chladicí a mazací kanály, které vycházejí z centrálního přívodu na vnitřní ploše náboje, nelze vyrábět konvenční výrobní technologií (např. práškovou metalurgií) v těchto rozsazích průměrů nebo jen v omezené míře, protože tělo kotouče je často jen několik milimetrů silné. Délky, které mají být vrtány, také často překračují ekonomicky dosažitelné poměry průměru k délce pro tělesa kotoučů s velkými průměry.

Vnitřní kanály působí proti tepelné roztažnosti břitové destičky a snižují lokální přehřívání. Vhodným návrhem procesu se zvyšuje životnost břitové destičky. Cílený přívod snižuje množství použité chladicí kapaliny ve srovnání se standardním chlazením. Eliminuje se také tvorba krátkých třísek, což vede ke snížení procesních problémů, jako je zasekávání třísek, a ke spolehlivému odvodu třísek z drážky. [70; 71]

3.2.5.7 Multifunkční nástroje

Lze konstruovat takové nástroje, které mohou vykonávat více operací, např. dokážou vrtat, srazit hranu a frézovat závit. Tyto nástroje se vyplatí zejména při velkosériové výrobě, zkracují výrobní čas. [72]



Obrázek 49 Výrobní postup

(Zdroj: [72])

3.2.5.8 Mikronástroje

Z výrobního hlediska je někdy potřeba navrhnout a vyrábět i rozměrově skromné výrobky (elektronické přístroje, senzory, optika, vstřikovací komponenty motorů i tiskáren, filtrační technika, pro lékařský, letecký a kosmický průmysl atd.), u kterých by aplikace standardních nástrojů (průměry v řádech milimetrů) nebyla platná, z tohoto důvodu jsou vyráběny mikronástroje, v našem případě mikrofrézy.



Obrázek 50 Mikronástroje

(Zdroj: [73])

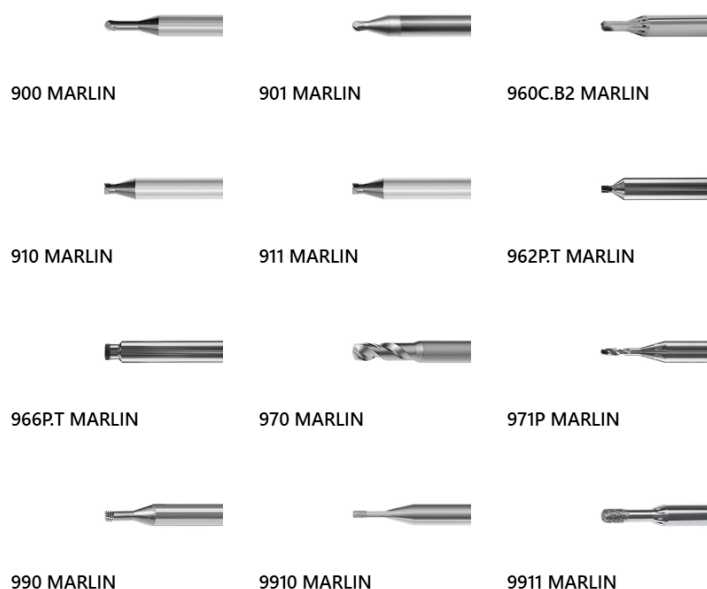
Dnešními technologiemi, na moderních strojích jsme schopni vyrobit nástroje o průměru 0,1–3 mm s různou geometrií špičky, určené především pro frézování, obrábění otvoru (vrtání) a soustružení s přesností až $\pm 1 \mu\text{m}$. [74; 75; 76]



Obrázek 51 Mikronástroje

(Zdroj: [74])

Řadu nástrojů *MARLIN 3D LASER* charakterizuje především technologie výroby. Jedná se o nástroje vyráběné s přispěním nejnovější laserové technologie *FEMTO*, které umožňují mikroobrábění. Technologie *FEMTO* je schopna produkovat extrémně krátké světelné pulzy, obvykle v rozsahu femtosekund. Doba trvání pulzů umožňuje mimořádně přesné zpracování materiálů s minimální produkcí tepla.



Obrázek 52 Nástroje MARLIN různých sérií

(Zdroj: [77])

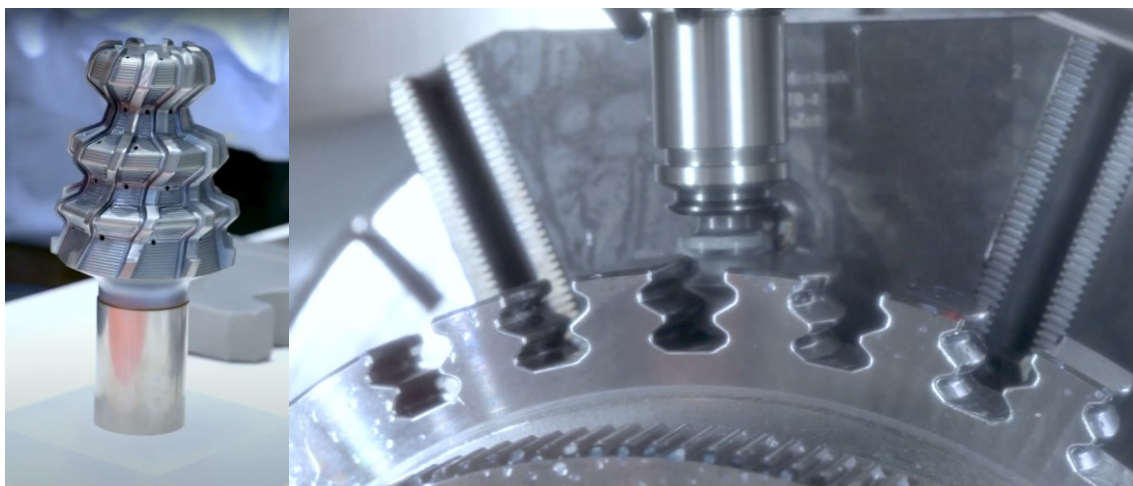
Konečný tvar nástroje je definován 3D laserovým obráběním, tato technologie umožňuje vytvářet jedinečné řezné geometrie, které jsou nevhodné pro konvenční techniky broušení. Nástroje se vyrábí od průměru 0,2 mm. [78; 79; 80; 81]

Nástroje *ZECHA IGUANA* mají jako první na světě laserově broušené diamantové (*diapovlaky*) povlaky, jejichž výsledkem jsou dokonale ostré hrany. Tato inovace vede ke zvýšení životnosti nástrojů, výkonu a odolnosti. Ostré hrany snižují řezné síly, nastává menší tření a tvorba tepla při obrábění, což vede k hladším řezům a pozitivně ovlivňuje jakost povrchu. Snižené řezné síly také minimalizují vychýlení nástroje a tlumí vibrace. Zvýšená odolnost diamantového povlaku výrazně prodlužuje životnost nástrojů. Snižuje potřebu častých výměn, zvyšuje celkovou produktivitu a zlepšuje kvalitu povrchu.

Nové miniaturní kulové nebo toroidní stopkové frézy s břity ve spirále naleznou uplatnění při obrábění dílů vstřikovacích forem, kde by mohly nahradit časově náročné opracování elektroerozivním obráběním. [82; 83; 84; 85]

3.2.5.9 Tvarové frézy

Jedná se o frézy nesoucí nějaký tvar, respektive vytvářející dutinu určitého tvaru. Mohou být normalizovány (výroba drážek – rybinové, T-drážky), nebo navrženy a vyráběny speciálně na zakázku. V tomto případě jsou nástroje poněkud dražší. Zhotovují se pro obrábění dutin, nebo tam, kde chceme předejít použití více nástrojů. Odběratelem těchto fréz je zbrojní, automobilový a letecký průmysl, také naleznou uplatnění při frézování tvarových vložek (tvárníku a tvárnice) vstřikovacích forem, kdy se jedná o výrobky specifických a složitých tvarů v řádech kusů. [4; 18]



Obrázek 53 Tvarová fréza (vlevo) a frézování obrobku (vpravo)

(Zdroj: [86])

3.2.5.10 Frézy oboustranné

Oboustranné frézy mají dva řezné konce místo jednoho, což by mělo prodloužit životnost nástroje. Teoreticky je možné, aby konce těchto fréz byly rozličné. [87]



Obrázek 54 Oboustranná fréza KEO 931 (nahore) a HGC-4C (dole)

(Zdroj: [88], [89])

3.3 Ostatní

Dalšími nástroji sloužícími ke frézování jsou letmé frézy, okružní pily na kov a frézovací hlavy.

3.3.1 Letmé frézy

Letmá fréza („fly cutter“) je jednobřítý řezný nástroj zasazený do trnu. [18]



Obrázek 55 Letmá fréza

(Zdroj: [90])

3.3.2 Okružní pily na kov

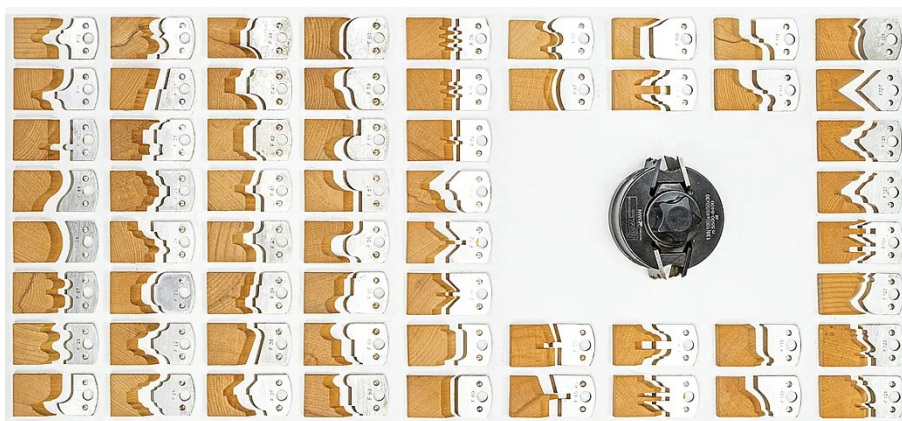
Okružní pily na kov jsou v zásadě tenké kotoučové frézy se slabě vybranými bočními stěnami. Vybrání na pilách slouží k ulehčení chodu a k zabránění nadměrného tření nástroje o kov. Můžeme je snadno rozeznat od normálních kotoučových fréz podle jejich charakteristického rysu, a to podle většího počtu zubů na shodném průměru. Tloušťka listů se pohybuje od 0,8 do 5 mm. Používají se k frézování hlubokých, úzkých drážek nebo

k dělení materiálu. Okružní pily se střídavými zuby se používají pro dělení oceli, pily s podbroušenými zuby se mnohdy používají k řezání mědi a jiných podobných materiálů. [18]

3.3.3 Frézovací hlavy

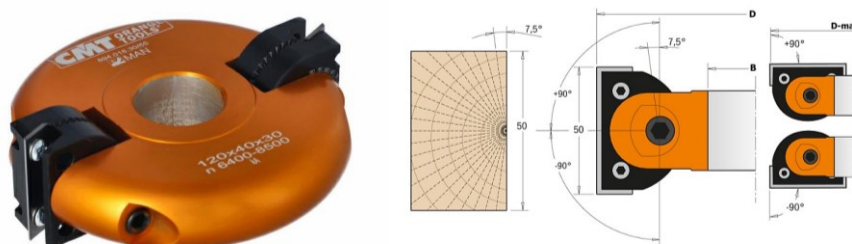
Jsou tělesa převážně z ocelí nebo tvrzených hliníkových slitin, do kterých se vkládají nože. Různé typy hlav pojmu rozličný počet profilových nožů, respektive *VBD*.

Užití naleznou při frézování dřeva, díky univerzální hlavě lze frézovat větší počet tvarů. Při frézování ocelí (kovových materiálů), se používají hlavy s *VBD*. [91]



Obrázek 56 Vytvoření různých tvarů profilovými noži na jedné hlavě

(Zdroj: [91])



Obrázek 57 Úhlová frézovací hlava s nastavitelným úhlem

(Zdroj: [92])

Při použití frézovacích hlav s *HSS* noži natvrdo připájenými je nutno uvážit tu okolnost, že až nastane otupění nože, musí se pájená hlava zaslat do brusírny. Pokud by došlo k většímu poškození nebo zlomení, stává se pájená frézovací hlava nepoužitelnou. [18]



Obrázek 58 Frézovací hlava s VBD (vlevo), frézovací hlava s pájenými zuby (vpravo)

(Zdroj: [93], [94])

Také frézovací hlavy lze vytvářet aditivními technologiemi, prototyp frézovací hlavy *Kraken* byl na Mezinárodním strojírenském veletrhu v Brně oceněn zlatou medailí za inovaci komponenty ve strojírenství. Cílem bylo zlepšení provozních vlastností, jakými jsou vyšší kinematika, delší životnost, intenzivní chlazení a variabilita.

Výhodou tohoto nekonvenčního konstrukčního řešení nástroje je zejména výrazná úspora hmotnosti při zachování tuhosti. Chladičí kapalina je přiváděna soustavou vnitřních kanálků nejen na čelo nástroje, jak je běžné u standardních fréz, ale i na hřbet s vyměnitelnými břitovými destičkami. Nástroj byl vytištěn na 3D tiskárně *EOS M290* technologií *DMLS* (*Direct Metal Laser Sintering*). [95; 96; 97]



Obrázek 59 Frézovací hlava Kraken

(Zdroj: [95])

3.3.4 Frézy používané v lékařství

I člověk, podobně jako strojní zařízení, se sestává z několika součástí, které jsme v současnosti schopni vyměnit (klouby, zuby atd.), nebo případně vylepšit. Aby bylo možné provádět operace, jsou zapotřebí speciální nástroje – v této práci si popíšeme několik druhů fréz.

3.3.4.1 Flexibilní frézy (dřeňové frézy)

Flexibilní frézy jsou dalším netradičním typem fréz, můžeme se s nimi setkat v lékařství, např. při frézování kostí (zejména pak při extrakci zlomeného kanylovaného hřebu).



Obrázek 60 Použití flexibilní frézy

(Zdroj: [98])

Flexibilní frézy jsou určeny k předvrtání dřeňové dutiny a mohou být používány opakovaně (avšak po použití by mělo dojít ke sterilizaci). Stejně jako u výroby závitové díry, kde je potřeba sada čítající tři závitníky, tak i zde by se měla zanechat souslednost procesu, dokonce se nedoporučuje vynechávat některé velikosti fréz, tzn. je potřebné frézovat po 0,5 mm. Kompletní řada začíná frézou o průměru 8 mm (kterou se musí začít, je speciálně upravena k čelnímu záběru) a pokračuje po 0,5 mm až do průměru 16,5 mm.



Obrázek 61 Sada flexibilních fréz

(Zdroj: [99])

Při používání se nesmí užívat zpětný chod vrtačky. Při sebemenším zatížení frézy může totiž dojít k „rozvinutí“ ohebného hřídele.

Tyto nástroje, jako každé jiné, jsou náchylné k opotřebení, což vede k zvýšení řezného odporu. Oproti frézování oceli bychom měli minimalizovat čas potřebný k frézování (především mj. aplikací opotřebovaných nástrojů), což je totéž procento času, který stráví pacient v anestezii. Nehledě na možnost většího poškození tkáně v okolí vyvrtané dutiny. [98; 99; 100]

Frézy se skládají z těchto elementů:

- *Rychlospojka* – Část frézy, která je uzpůsobena k napojení fréz na běžně používané pohonné jednotky.
- *Flexibilní hřídel* – Dvojitě protichůdné vinutí flexibilní části frézy zaručuje dokonalý přenos torzní mechanické energie.
- *Funkční koncovka* – Pět řezných břitů na jedné fréze. Design břitů je uzpůsoben pro precizní odvod třísek kostního materiálu. Koncovky průměru 8 mm, 8,5 mm a 9 mm jsou vybaveny doplňujícími předními řeznými hranami.

3.3.4.2 Chirurgické frézy

Tyto frézy malých rozměrů jsou používány pro přípravu kosti a zubní struktury. Slouží k odkrytí a uvolnění retinovaných zubů, resekce špičky kořene a odstranění nadbytečné kostní tkáně, šetrné preparace kostní tkáně, oddělení zubů, obzvláště oddělení kořene atd.

Dlouhý, tenký krk zajišťuje dobrý výhled do operačního pole během preparace. Frézy nabývají rozličných tvarů (kónických, kulových, válcových aj.), dle použití. Stejně jako frézy do kovů mohou i tyto frézy být opatřeny povlakem. [101]



Obrázek 62 Chirurgická fréza C254A (vlevo), chirurgická fréza C141AC Allport (uprostřed), chirurgická fréza RF A (vpravo)

(Zdroj: [101], [102], [103])

4 BROUŠENÍ

Broušení se vedle honování, lapování a superfinišování řadí mezi abrazivní metody broušení. Při broušení dochází k použití nástrojů s nedefinovanou geometrií břitu. Tyto metody jsou používány pro odběr materiálu z obrobku strojírenských součástí, u kterých jsou požadovány vysoké parametry přesností obrobených ploch.

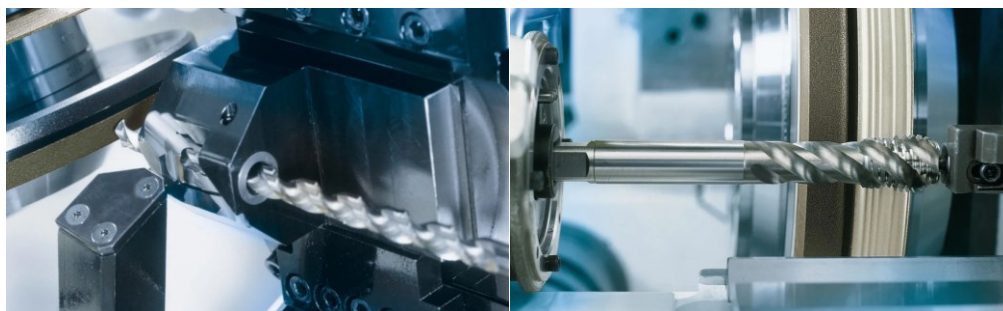
Broušení je dokončovací operace, vyznačuje se velkou rozměrovou přesností, správností geometrického tvaru a dobrou jakostí povrchu. Díky dodržení vyšší tvarové a rozměrové kvality je známé též jako vysoce přesná dokončovací operace.

Tabulka 4 Dosahované přesnosti obrobených ploch

Broušení		Přesnost rozměrů IT		Drsnost plochy Ra [μm]	
		střední	rozsah	střední	rozsah
Vnější rotační plochy	hrubování	10	9 až 11	1,6	0,8 až 3,2
	dokončování	5	5 až 6	0,4	0,2 až 0,6
	jemné	4	3 až 5	0,2	0,05 až 0,4
Vnitřní rotační plochy	hrubování	9	9 až 11	1,6	1,6 až 3,2
	dokončování	7	5 až 7	0,8	0,4 až 1,6
	jemné	5	3 až 6	0,2	0,05 až 0,4
Rovinné plochy	hrubování	10	9 až 11	1,6	1,6 až 3,2
	dokončování	7	5 až 7	0,8	0,4 až 1,6
	jemné	5	3 až 6	0,2	0,05 až 0,4

(Zdroj: [9])

Broušení je prováděno na brousicích strojích pomocí brousicích kotoučů. Tyto nástroje se liší od jiných nástrojů používaných u jiných druhů třískového obrábění. Nemají totiž pevně definovanou geometrii břitu, rozložení brousicích zrn je statistické po celé ploše kotouče a odebírají velké množství malých třísek. [9]



Obrázek 63 Brousicí stroje na řezné nástroje

(Zdroj: [104])

5 MATERIÁLY POUŽÍVANÉ K VÝROBĚ NÁSTROJŮ

Proces obrábění je poměrně složitý proces, který je složen z mnoha proměnných. Všechna špatná rozhodnutí se promítají do ceny nebo do délky procesu. Řezný proces závisí na vlastnostech řezné části nástroje, který je vyhotoven z příslušného nástrojového materiálu, jenž je vybrán podle požadavků. Produktivita obrábění je úměrná zvolenému druhu řezného materiálu. Každý z řezných materiálů má jak své přednosti, tak i nevýhody. Doposud nebyl vymyšlen (nebo objeven) univerzální řezný materiál, jenž by byl vhodný pro všechny druhy obráběcích prací a pro všechny typy obráběných materiálů. Zajímavostí je, že i tak se čas výroby podobného kusu na počátku a konci 20. století redukoval ze sta minut na jednu minutu obrábění.

K základním požadavkům na nástrojový materiál patří jeho tvrdost, odolnost proti opotřebení, tepelná vodivost, pevnost v ohybu a houževnatost i cena. Při obrábění vniká řezný klín do obrobku za působení tepla a tlaku. Proto by měl nástrojový materiál vždy nabývat větší tuhosti než ten obráběný, také by měl vykonávat práci při vyšších a vysokých teplotách po dostatečně dlouhou dobu.

U řezných částí nástrojů se nejčastěji můžeme setkat s oceli – nástrojovými oceli nelegovanými (uhlíkovými), legovanými (nízkolegovanými, střednělegovanými), a vysokolegovanými (rychlořeznými – *RO*, *HSS*), dále se stellity, slinutými karbidy (*SK*) bez nebo s tvrdými povlaky. Nejsou neobvyklé cermety (ceramic-metal), keramické nástrojové materiály (*KM*), polykrystalické kubické nitridy bóru (*PKNB*), polykrystalické diamanty (*PKD*) ani ty přírodní.

Klíčovými se na poli obrábění stávají nástroje s vyměnitelnými destičkami ze slinutého karbidu, které naleznou uplatnění v automatizovaných výrobních linkách a obráběcích centrech, kde jsou majoritně zastoupeny.

Použitelnost nástrojů při jejich zapojení do dílčích výrobních úseků a pružných výrobních systémů je podmíněna jejich vysokou kvalitou a stabilitou parametrů. [10; 9; 105]

5.1 Rychlořezné oceli

Tvrdost vysokolegovaných rychlořezných ocelí je dána zakalením na martenzit a přítomností legujících prvků *Cr*, *W*, *Mo* a *V*, které se slučují s uhlíkem obsaženým v oceli. Značné procento legujících prvků ve struktuře umožňuje vysokou prokalitelnost, ochlazovací rychlosti mohou být relativně nízké a tím se snižuje možnost vzniku deformací.

Vysokolegované *RO* snáší při obrábění teplotu přibližně až 600 °C. Používají se pro řezné nástroje vystavené nárazům při přerušovaném řezu. Optimálního využití dosáhneme použitím vhodného řezného prostředí (řezných emulzí a olejů). Pro nástroje z *RO* se doporučuje používat kvalitnější druhy vysoce výkonných rychlořezných ocelí, uvedených v *tabulce 5*. [9; 10; 105]

Tabulka 5 Charakteristiky aplikací rychlořezných ocelí

Označení podle normy	Hutní označení	Obráběné materiály a charakteristika pracovních podmínek
19 802	Maximum Speciál G Extra	Značně namáhané nástroje pro obrábění materiálů o nižší a střední pevnosti cca do 850 MPa hrubováním
19 830	Maximum Speciál M05	Značně namáhané nástroje pro obrábění materiálu do pevnosti 900 MPa i přerušovaným řezem a při požadavku na vysokou houževnatost
19 855	Maximum Speciál 55	Vysoce namáhané nástroje pro obrábění ocelí a ocelolitiny o vysoké pevnosti a materiálů těžkoobrobitelných při vysokých řezných rychlostech
19 856	Maximum Speciál 55G	Vysoce namáhané nástroje pro obrábění ocelí a ocelolitiny o vysoké pevnosti a materiálů těžkoobrobitelných při vysokých řezných rychlostech
19 857	MKG	Hrubování oceli a ocelolitiny o vysoké pevnosti a materiálů těžkoobrobitelných
19 858	Radeco C	Jemné a přesné obrábění ocelí a ocelolitiny o vysoké pevnosti, tvrdých a abrazivních materiálů, nepřerušovaný řez
19 859	MK	Nejvýše namáhané nástroje pro obrábění, zejména hrubování oceli a ocelolitiny o vysoké pevnosti, pevných a houževnatých materiálů
19 860	MKH	Nejvýše namáhané nástroje pro obrábění, zejména hrubování oceli a ocelolitiny o vysoké pevnosti, pevných a houževnatých materiálů
19 861	Radeco M10	Jemné obrábění ocelí a ocelolitiny, ubírání třísek velkého průřezu u ocelí a ocelolitiny o vysoké pevnosti

(Zdroj: [9])

5.2 Stellity

Stellity jsou řezné slitiny, jejichž tvrdost a řezivost je ovlivněna přítomností velkého množství karbidů chromu a wolframu a menším množstvím niklu, molybdenu a dalších prvků. Přítomnost železa ve stellitech by měla být menší než 10 %, přítomnost železa je brána jako nečistota. Stellity jsou nekujné, křehké, běžnými nástroji je nelze obrobit, neprovádí se u nich tepelné zpracování. Nástroje z této slitiny se odlévají buď vcelku, nebo jako břitové destičky a po odlití dochází pouze k přebroušení. [9; 10; 105]

5.3 Slinuté karbidy

Výroba *SK* začala již v roce 1926, kdy německá firma *Krupp* začala s průmyslovou výrobou slinutého karbidu typu *WC-Co* (pod názvem *WIDIA*, toto zkratkové slovo vzniklo z německého *wie diamant*, což znamená „jako diamant“). O rok později byl světu představen slinutý karbid *Widia N* (94% WC+6% Co), který úspěšně napodobil strukturu diamantu.

Slinuté karbidy se vyrábí metodou práškové metalurgie spékáním karbidů wolframu, titanu a dalších kovů. Pojivem při slinování karbidů je kobalt. Tvrdost *SK* je dána vlastnostmi materiálu, proto se ani zde nesetkáme s tepelným zpracováním ke zvýšení tvrdosti. *SK* snáší zahřátí břitů až na teplotu 900 °C.

Slinuté karbidy disponují lepší otěruvzdorností než nástroje z *RO*, avšak jsou křehké, mají sklon k vydrolování břitů a jsou obtížně obrobitelné.

Slinuté karbidy podléhají dělení podle mezinárodní normy *ISO*, z hlediska řezného procesu zahrnuje tři skupiny:

- *P* – *SK* pro obrábění materiálů, dávající plynulou třísku
- *M* – *SK* pro obrábění materiálů, dávající plynulou i krátkou třísku
- *K* – *SK* pro obrábění materiálů, dávající krátkou třísku

Slinuté karbidy s tvrdými povlaky

Tvrdost a odolnost je ještě zvýšena aplikací povlaku karbidu titanu *TiC*, nitridu titanu *TiN* nebo oxidu hlinitého *Al₂O₃*. Povlaky mohou být jednovrstvé nebo vícevrstvé. [9; 10; 105]

5.4 Keramické řezné materiály

Keramické materiály lze rozdělit do dvou základních skupin podle složení. Keramické materiály na bázi kysličníku hlinitého (základní složkou je zde korund) nebo nitridu křemičitého.

Řezivost nástrojů je dána přímo tvrdostí korundu, případně přimíslených karbidů. Nástroje zhotovené z tohoto řezného materiálu mají vysokou odolnost proti otěru a snášejí teploty 1200 °C i vyšší (nástroje si i v takových teplotách zachovávají tvrdost). Pozitivními jevy je také vysoká odolnost vůči abrazivnímu opotřebení, odolnost vůči chemickým vlivům. Jejich podstatnou výhodou je relativně nízká cena. Pevnost, tvrdost a odolnost proti tepelným

růzům řezné keramiky závisí na hustotě, velikosti a rozdělení zrn. Při zvyšující se hustotě a snižující se velikosti zrn dochází ke zlepšení vlastností.

Řezná keramika se dělí na několik základních skupiny podle chemického složení, vlastností a doporučeného použití. Jedná se o oxidickou keramiku, kam spadá čistá keramika (bílá), polosměsná a směsná keramika (černá) a neoxidickou, tedy keramika na bázi nitridu křemíku. [9; 10; 105]

5.5 Polykrystalický kubický nitrid boru

Tento materiál se volně v přírodě nenachází, je syntetický, vyráběn na specializovaných pracovištích. Vlastnosti polykrystalického kubického nitridu boru (*CBN* nebo *PKNB*) se dají upravovat změnou velikosti krystalů a obsahu či typu pojiva. Nízký obsah *CBN* v kombinaci s keramickým pojivem dává lepší odolnost proti opotřebení a chemickou stabilitu. Tento řezný materiál se hodí především pro konečné úpravy tepelně odolných slitin, tvrdých ocelových a litinových materiálů nebo tam, kde je při obrábění nahrubo třeba počítat s vysokým mechanickým namáháním břitů a s vysokým tepelným zatížením.

Kubický nitrid boru (*CBN*) se používá jako polykrystalický řezný materiál ve třech různých formách provedení:

- *Jako masivní vyměnitelná břitová destička.*
- *Jako povlak, napečený na podkladu ze slinutých karbidů.*
- *Jako řezné těleso, naletované na podkladu z slinutých karbidů.*

Kubický nitrid boru je extrémně tvrdý řezný materiál (vysoká tvrdost za tepla přetrvává až do teploty 2 000 °C) s vysokou odolností proti brusnému opotřebení. Obráběné plochy není potřeba přebrušovat, tohoto atributu se hojně využívá při výrobě a renovaci kalených forem. Výhodou je i dobrá chemická stabilita během třískového obrábění. Nicméně je relativně křehký, avšak houževnatý a tvrdý jako řezná keramika. Největší nevýhodou je vysoká pořizovací cena tohoto syntetického řezného materiálu. [9; 10; 105]

5.6 Polykrystalický diamant

Polykrystalický diamant (*PKD*) je nejtvrdší řezný materiál, jeho tvrdost vychází ze struktury, ve které je každý uhlíkový atom kovalentně vázán k dalším čtyřem atomům, umístěným ve vrcholech čtyřstěnu. Měření tvrdosti je obtížné, jelikož závisí na krystalografickém směru. Jeho mimořádná tvrdost mu umožňuje odolávat vysokému brusnému otěru. Životnost při

obrábění s *PKD* je výrazně (*10krát – 100krát*) vyšší než u slinutých karbidů. Přes svou tvrdost je doporučován pro obrábění všech neželezných kovů a nekovových materiálů (hliníku a jeho slitin, mědi, mosazi, titanu a jeho slitin, sklolaminátu, tvrdého kaučuku, grafitu, také i dřeva a dalších materiálů). Jedná se vesměs o materiály, jejichž teplota tavení leží pod 700 °C a nemají afinitu k uhlíku. Diamant má nízkou teplotní stálost. Teplotní interval použití *PKD* při obrábění je okolo 600 °C, při dosažení teplot nad 650 °C se mění na grafit, tedy nevhodné pro houževnaté, vysoce pevné materiály obrobků. Kvůli své křehkosti vyžaduje *PKD* stabilní podmínky obrábění, tuhé nástroje a stroje a také vysoké řezné rychlosti.

Umělý monokrystalický diamant se postupně vyvíjí od 50. let 20. století. *PKD* vzniká v laboratořích při reprodukovatelné syntéze diamantu – syntetickým slinováním mnoha částic diamantu, obvykle o velikosti 2 až 30 mikronů, s kovovým pojivem (obvykle kobaltem) – za tlaků až 6 GP při teplotě nad 1500°C. Použitá technologie s aplikací vysokých bloků se, při přípravě polykrystalického diamantu, projevuje relativně vysokou cenou a omezenými rozměrovými možnostmi.

Monokrystalické přírodní diamanty se využívají jako součásti měřících přístrojů – identory, doteky. Je možné u nich získat dokonalé ostří, umožňující obrábět součásti s velkou přesností. [9; 10; 105; 106; 107]

5.7 Kompozitní materiály

Dalším, řekněme mladým, řezným materiálem, který není v technické praxi tak rozšířený, respektive se zatím používá jen ve stavebnictví (např. při opracování kamene), je kompozitní materiál na bázi diamant - kov. Tyto materiály obsahují vysokou koncentrací diamantů v kovové vazbě, zhotovené bez nutnosti použití vysokých tlaků a teplot běžnými postupy práškové metalurgie. [9]

5.8 Cermety

Cermety jsou řezné materiály, u kterých je *WC* nahrazen převážně karbidy titanu (*TiC*, *TiN* nebo *TiCN*) s niklovým nebo (kovovým) pojivem (**ceramic-metal**). Vynikají vysokou odolností proti difúznímu oxidačnímu opotřebení, vysokou chemickou stabilitou, tvrdostí za tepla a odolností vytvářet nárůstek. Jsou vhodnými materiály pro dokončovací obrábění vysokými řeznými rychlostmi a nízkými průřezy třísek. [9; 10; 105]

6 POVLAKY

Povlaky se na řezné nástroje nanášejí a priori kvůli prodloužení jejich životnosti, snížení řezné síly po dobu obrábění, zvýšení řezných rychlostí a rychlosti posuvu. Mohou vést ke zlepšení drsnosti obráběných povrchů. Jsou schopny nahradit materiály s vyšším zušlechťením (dražší) těmi méně zušlechťenými (levnější), vhodným povlakem se odstraní rozdíly. Volba povlaku by měla být přizpůsobena obráběcí operaci. Na nástroj, který vykazoval známky opotřebení, respektive který byl přebroušen, lze nanést opětovně vrstvu povlaku

Kromě obvyčej ve formě různých povlaků z tvrdých materiálů (TiN , $TiAlN$, aj.), existují supertvrdé povlaky z uhlíku. Mají vynikající vlastnosti týkající se jejich odolnosti vůči opotřebení, otěru a odolnosti proti korozi. Povlaky *DLC* (*Diamond Like Carbon* – uhlík ve formě diamantu) mají ve srovnání s běžnými povlaky TiN velmi dobrou odolnost proti přilnavosti k různým materiálům. Ačkoli mají strukturu podobnou spíše grafitu, vykazují vlastnosti diamantu. I přesto, že disponují vyšší mikrotvrdostí, jsou velmi pružné. Povlaky *DLC* mohou být procesem chemického vylučování z plynné fáze plazmy (*CVD*) obsahující uhlík nanášeny prakticky na všechny kovy a slitiny kovů, lehké kovy, ale i na nekovové materiály (křemík, sklo, keramika, plasty apod.), přičemž velmi dobře přilnou.

Povlakování rozdělujeme podle způsobu nanášení do dvou základních skupin, *CVD* a *PVD*. [10; 108; 109]



Obrázek 64 Řezné nástroje opatřené povlakem

(Zdroj: [108])

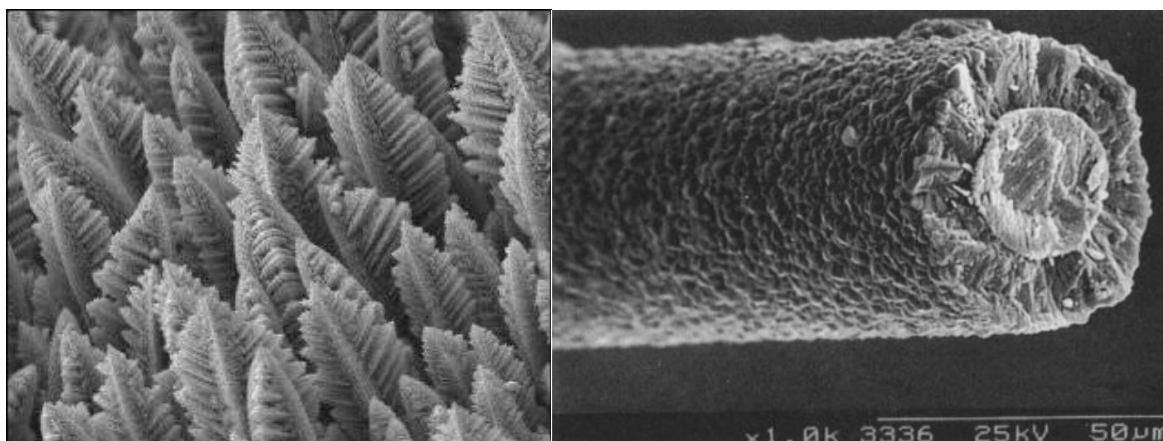
6.1 Metoda CVD

Metoda *CVD* (chemické vylučování z plynné fáze) se používá např. při povlakování řezných nástrojů ze slinutých karbidů, nástrojových ocelí atp. Je vhodná pro výrobu vícevrstevných povlaků, protože pomocí plynné fáze lze snadno dosáhnout různého složení vrstev. Vrstvy se mohou nanášet na povrch v různé tloušťce, kombinaci a pořadí.

Mezi výhody povlaků vytvořených metodou *CVD* patří nízké pnutí nanášených vrstev, vysoká nosnost, výborná adheze povlaku v důsledku vzniku difuzní vazby, jednotnost povlaku nezávisle na geometrii substrátu.

Mezi nevýhody povlaků vytvořených metodou *CVD* patří dlouhý pracovní cyklus 8-10 hodin, nutnost tepelného zpracování ocelí po povlakování, ekologicky nevyhovující pracovní plyny.

Tenké vrstvy povlaku, vykazující nízké pnutí, jsou na substrátu (nástroji) vytvářeny řízenými chemickými reakcemi probíhajícími na povrchu substrátu za depoziční teploty pohybující se v rozmezí 900-1050 °C. Tento proces stojí na základě termodynamiky a kinetiky při řízení depozice. Termodynamika řídí hnací sílu reakcí a určuje rovnovážný stav, kdežto kinetika určuje rychlost, s jakou tyto reakce probíhají, a ovlivňuje mechanismy růstu vrstvy (filmu). Páry se rozkládají nebo reagují s dalšími pracovními plyny a tím se vytváří povlak na substrátu. Pracovní plyny se průběžně přivádějí do reakční zóny a vedlejší produkty jsou odváděny pryč. Procesy *CVD* lze provádět za atmosférického tlaku nebo ve vakuu. Tloušťka vrstvy povlaků je v rozmezí 5 až 20 μm . [10; 110; 111]



Obrázek 65 Nanostrukturovaný fraktální povlak z TiO_2 (vlevo), řez drátem průměru 25 μm , který byl potažen povlakem pomocí HFCVD (vpravo)

(Zdroj: [112], [113])

CVD lze dále dělit podle výrobní technologie na:

- *High Temperature – CVD (HT-CVD)* je pokrokovou metodou chemického vylučování z plynné fáze při vysoké teplotě. Touto metodou je opatřena povlakem většina nástrojů ze slinutého karbidu. Slinuté karbidy, které jsou opatřeny povlakem provedeným metodou *HT-CVD*, se vyznačují vysokou odolností vůči opotřebení, která je způsobena povlakem s relativně větší tloušťkou. [114]
- *Middle Temperature – CVD (MT-CVD)* je vyhotovena metodou chemického vylučování z plynné fáze při středně vysoké teplotě. [115]
- *Plasma Assisted – CVD (PACVD)* je chemická depozice vrstev za asistence plazmatu ve vakuu. Jemnozrnné povlaky z tvrdých materiálů se nanášejí při nižších teplotách (470-530 °C), proto jsou vhodné k nanášení povlaků DLC (diamantu podobný uhlík). [111; 116]
- *Plasma Enhanced CVD (PECVD)* při procesu se nanáší na substráty tenké povlaky, při nižší teplotě, než s jakou se můžeme setkat u klasické metody CVD. Nanesení povlaku pomocí reakčních plynů mezi paralelními elektrodami. Substrát je uložen na uzemněné elektrodě. [117; 118]
- *Hot Filament CVD (HFCVD)* využívá žhavicí vlákno k chemickému rozkladu zdrojových plynů. Procesní plyn se přivádí do vakuové komory, kde je plyn aktivován žhavými kovovými vlákny. Metoda se používá například pro výrobu diamantových povlaků (DLC). [119; 120]
- *Cascade Arc CVD (CACVD)* jedná se o metodu CVD s lavinovým plazmatickým výbojem provozovanou bez použití povlakovacího plynu a při vysokém tlaku. [121]
- *Laser Induced CVD (LICVD, LCVD)* jedná se o laserem indukovanou metodu, kdy je depozice mikročástic povlaku na substrát s vysokou přesností. Na substrát je zaostřen laserový paprsek, který ozařuje povrch substrátu umístěného v pracovní komoře, která je naplněna procesním plynem. Zaostření laserovým paprskem se používá k ohřevu substrátu. Existují dva různé typy metody *LCVD*, pyrolytická *LCVD* a fotolytická *LCVD* metoda. [122]
- *MicroWave Plasma CVD (MWCVD)* mikrovlnná plazmatická CVD metoda. Substrát je umístěn na ohřívači, kde se vytváří plazma. Nově jsou mikrovlny směřovány podél

vlnovodu a jsou spojeny do komory přes anténu. Mikrovlny procházejí krystalovým oknem do reaktoru. [119]

- *Atomic Layer Deposition (ALD)* lze považovat za formu *CVD*, která využívá samoregulační povrchové reakce. [117; 123]
- *Metal-Organic CVD (MOCVD)* využívá metal-organické sloučeniny jako prekursor, které jsou zahřívány v komoře reaktoru za vzniku páry. Vzniklá pára pak reaguje s polovodičovým substrátem, což vede k vytvoření tenké vrstvy. [117; 124]

Výhodou *CVD* oproti *PVD* je skutečnost, že s *CVD* je snadné potahovat výrobky zevnitř.

6.2 Metoda PVD

Metoda povlakování *PVD (Physical Vapor Deposition)* v překladu fyzikální depozice vrstev. Nalezne použití při povlakování frézovacích, soustružnických, stříhacích a lisovacích nástrojů, závitníků, vrtáků, částí vstřikovacích forem, dále v lékařství, elektronice, v leteckém a automobilovém průmyslu. Tvrdé povlaky na bázi kovů jsou vyráběny prostřednictvím částečně ionizovaných par kovů a jejich reakcí s některými plyny. Technika nanášení je řízená termodynamickými principy, při kterých se pevné materiály odpařují a transportují ve vakuu nebo nízkotlakém plynném prostředí, kde kondenzují na substrátu. Na základním materiálu se vytváří tenká vrstva s přesně definovaným složením (na bázi různých materiálů – kovů, slitin, keramiky, dokonce i některých polymerů).

Metoda je charakteristická nízkými pracovními teplotami, pod 500 °C. Kondenzace částic nastává i při sníženém tlaku, částice jsou uvolňovány ze zdroje částic (tzv. terčů). Uvolněné částice jsou ionizovány a reagují s atmosférou komory. Záporným předpětím jsou urychleny směrem k povrchu substrátu, kde se usadí ve formě tenké vrstvy homogenního povlaku.

Výhoda metody *PVD* oproti metodě *CVD* spočívá v nanášení látek při nízkých teplotách a s tím spojeným šetřením substrátu, vytvoří se tenčí vrstva. S tím je spjata udržování poměrně ostré řezné hrany, jak to vyžaduje především jemné a přesné obrábění.

Povlaky jsou označovány podle jejich složení, *TiN* – nitrid titanu, *TiCN* – karbonitrid titanu, *CrN* – nitrid chromu, *AlTiN* – titanový nitrid hliníku, *ZrN* – nitrid zirkonia, *SiOx/TiXCo* – nitrid titanu a křemíku. [10; 109; 115; 117; 125]

7 POČÍTAČOVÁ PODPORA KONSTRUKCE

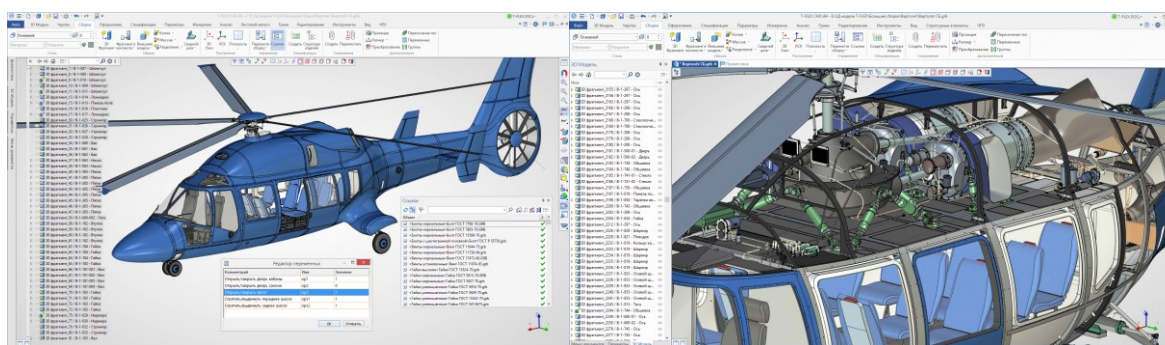
Počítačem podporované navrhování a projektování (*CAD computer aided design*) je technologie sloužící k navrhování, kreslení a výrobě technické dokumentace. *CAD* softwary nahradily techniky, ve kterých se nezdálo, že jediná možnost, jak opravit chybu, bylo začít znovu (tj. např. ruční kreslení).



Obrázek 66 Konstrukční kanceláře před nástupem CAD softwarů

(Zdroj: [126])

CAD softwary se hojně používají ve strojírenství, stavebnictví, ale také se mohou vyskytovat v umělecké sféře (např. modelování soch k odlévání, navrhování zahrad, design oblečení a obuvi), díky rozmachu levných 3D tiskáren a bezplatných *CAD* softwarů jsou dostupné pro širokou veřejnost na tzv. „hobby“ použití.



Obrázek 67 Helikoptéra vytvořená v T-FLEX CAD

(Zdroj: [127])

Výhodou softwarů je asociativita, dojde-li k optimalizaci (změně) příslušného dílu dané sestavy, tak se zaktualizuje i chování sestavy a vice versa. Dojde k přepsání změn i do výkresové dokumentace.

Není neobvyklé, když bude program rozšířen o dané funkce, že na modelech bude možno provádět simulace (pevnostní zatížení, teplotní zatížení a další), dále tytéž modely obrábět, aniž bychom opustili software. [128]

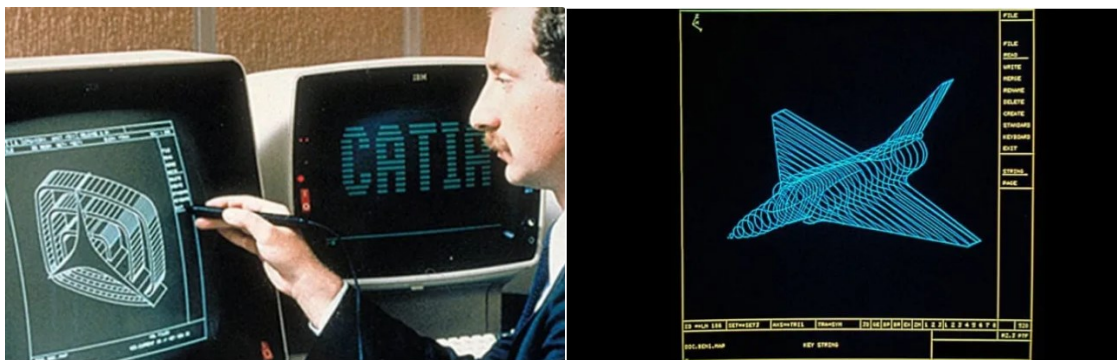
Historický vývoj

V historii *CAD/CAM* softwarů dominuje jméno Patrick Hanratty, jenž je považován za otce *CAD/CAM*, neboť software, který vyvinul, používalo více než 10 společností jako základ pro své komerční produkty v odvětví *CAD/CAM*.

Vývoj *CAD/CAM* v komerční sekci začal v šedesátých letech minulého století vyvinutím softwarového balíku pro numerické řízení. Kromě komerčního sektoru se na vývoji *CAD/CAM* systémů podíleli vědci a výzkumníci z *MIT*. Pracovali na technologii, která později tvořila základ pro *CAD*. Mezi tyto technologie patřily programovací jazyky, interaktivní nástroje pro návrh, *NC* obráběcí stroje, datová architektura *CAD* systémů, zobrazovací terminály a další.

Nejstarší *CAD* systémy napodobovaly tradiční (ruční) postupy kreslení. To znamenalo, že tyto systémy zpracovávaly pouze 2D data. Posun od 2D kreslení k 3D modelování nastal v podobě drátového designu. Využíval geometrii, která reprezentovala 3D objekty pomocí bodů v prostoru, přičemž tyto body byly propojeny čarami. Na začátku roku 1960 vyvinul Pierre Bézier řadu matematických technik, které popisovaly zakřivené povrchy automobilů. Renault používal Bézierovy křivky jako součást svého systému *UNISURF* k vytváření digitálních modelů. Společnost Dassault Systèmes později získala systém *UNISURF*, který se stal nezbytnou součástí systému *CATIA*, která byla vydána v roce 1977. Univerzitní vědci také vyvinuli techniky pro matematický popis povrchů, které tvořily základ moderního 3D modelování křivek a povrchů. Kromě matematických funkcí pro reprezentaci geometrie povrchů vedla výzkumná práce také k vývoji technologie modelování pevných těles. V roce 1987 společnost Parametric Technology Corporation, nyní PTC Inc., uvedla na trh *Pro/ENGINEER*. Tento program byl založen na geometrii pevných těles a parametrických technikách pro definování součástí a sestav.

Konec 80. let 20. století přinesl konkurenční boj mezi vývojáři 3D *CAD* softwarů, kteří se snažili vyrovnat uživatelskému rozhraní a možnostem *Pro/ENGINEER*. To dalo vzniku jader pro 3D modelování, jakými jsou *Parasolid* a *ACIS*. *ACIS*, vyvinutých společností Spatial, ta byla prodána mnoha dodavatelům 3D *CAD* softwaru, zejména *AutoCADu*, který jádro licencoval v roce 1990.

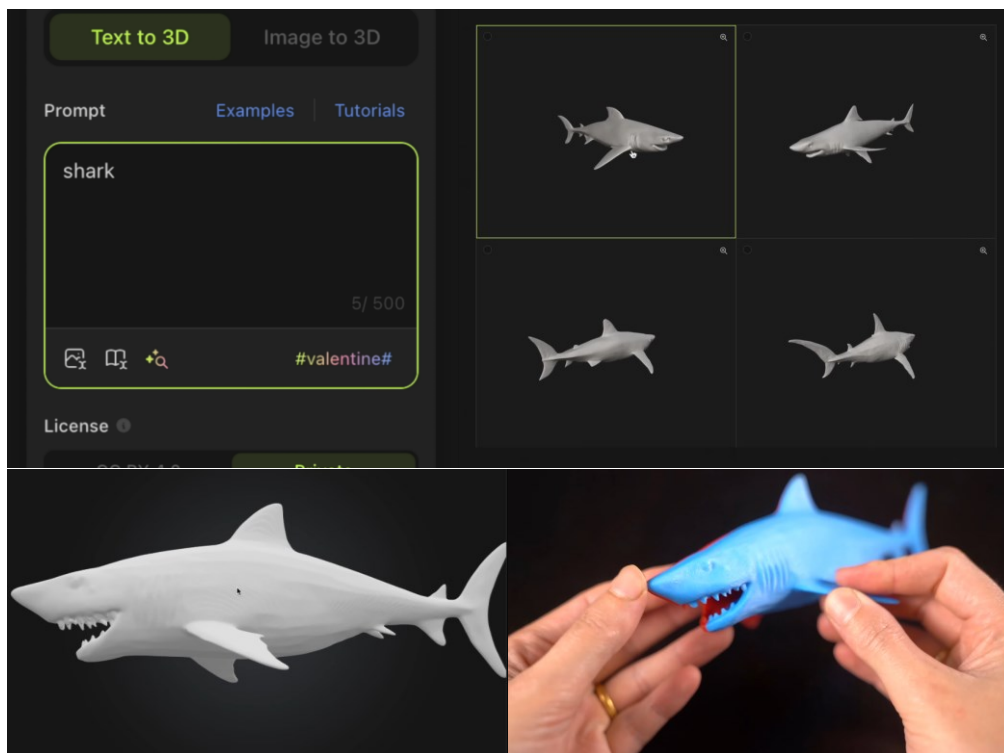


Obrázek 68 Program CATIA v osmdesátých letech dvacátého století

(Zdroj: [129])

V současné době dochází k rozmachu rozšířené reality (*AR*), která umožňuje vizualizaci *CAD* modelů v reálném čase a v reálném prostředí prostřednictvím chytrého telefonu nebo tabletu. [130; 131]

Technologií, která v současné době rezonuje společností a napříč odvětvími, je rozvoj umělé inteligence (*AI*). Nicméně *AI* je v raných fázích vývoje, i tak je schopna pomocí napsaného požadavku nebo obrázku vygenerovat 3D model.



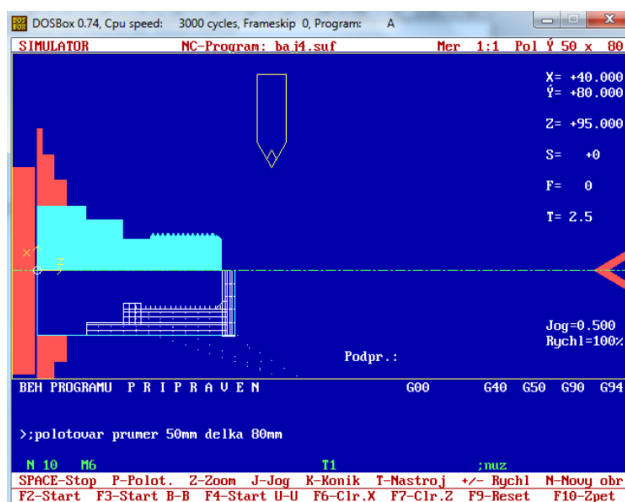
Obrázek 69 Zadání požadavku v textové formě (vlevo nahoře), nabídka čtyř variant vytvořených modelů (vpravo nahoře), vybraná varianta (vlevo dole) a vytisknutý model na 3D tiskárně (vpravo dole)

(Zdroj: [132])

8 POČÍTAČOVÁ PODPORA OBRÁBĚNÍ

CAM (*computer aided machining*, počítačová podpora obrábění) je v podstatě software, který slouží k programování *CNC* (*computer numeric control*) strojů (frézovacích, soustružnických, kombinovaných, speciálních, drátořezů či jiných typů programem řízených strojů). Většina komerčních *CAD* programů lze rozšířit o *CAM* software. [133; 134]

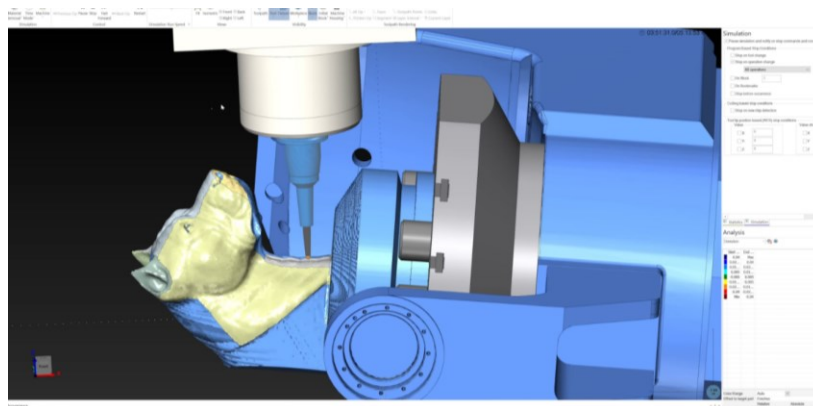
Programy mohou být 2D, např. program *Mikroprog S* (určen pro soustružení) nebo *Mikroprog F* (určen pro frézování). [135]



Obrázek 70 Simulace soustružení v programu Mikroprog S

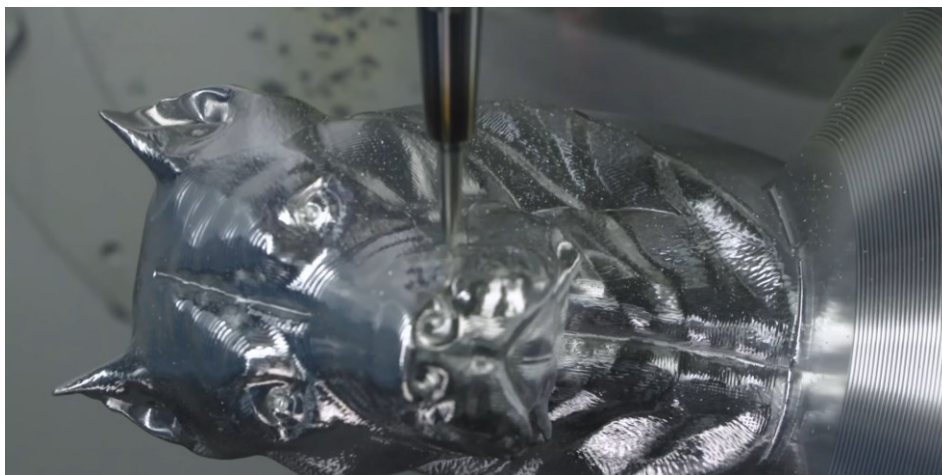
(Zdroj: [136])

V dnešní době se převážně setkáme s 3D programy, které simulují takřka skutečný průběh obrábění. Na výběr je množství operací. Výhodou je, že lze do simulace zahrnout typ stroje, jímž podnik disponuje. Simulace se zastaví při každé kolizi nástroje (např. se svěrákem).



Obrázek 71 CAM simulace a tvorba obráběcího programu

(Zdroj: [137])

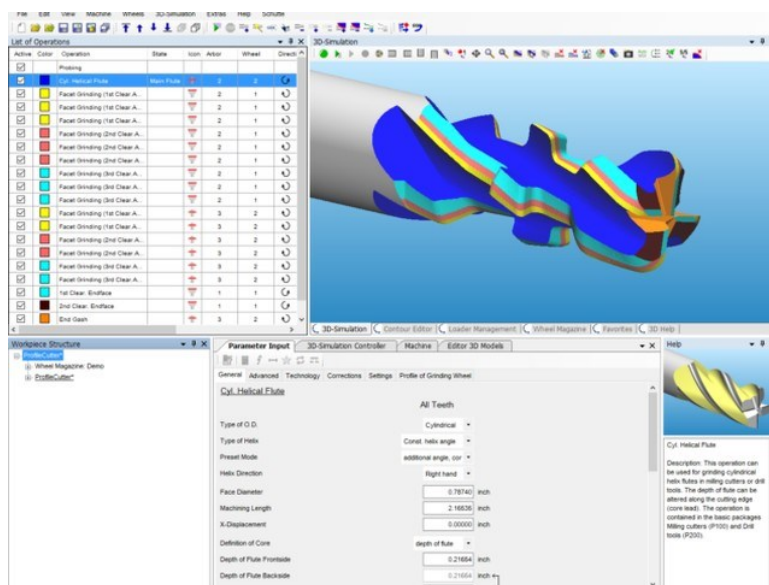


Obrázek 72 Aplikace na skutečné součásti

(Zdroj: [137])

8.1 Numroto

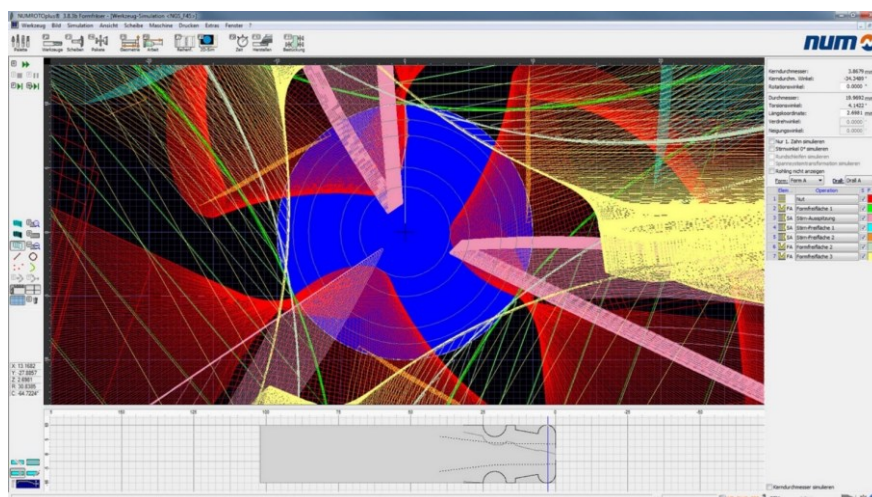
Jedná se o program primárně určený pro návrh a konstrukci řezných nástrojů. Za programem stojí společnost *NUM AG*, jádrem systému *NUMROTO* je programovací systém *NUMROTOplus*. Program lze získat ve verzích *NUMROTO plus* a *NUMROTO X*. Standartně verze disponují 2D a 3D simulací a výkresovým prostředím.



Obrázek 73 Náhled do programu Numroto

(Zdroj: [138])

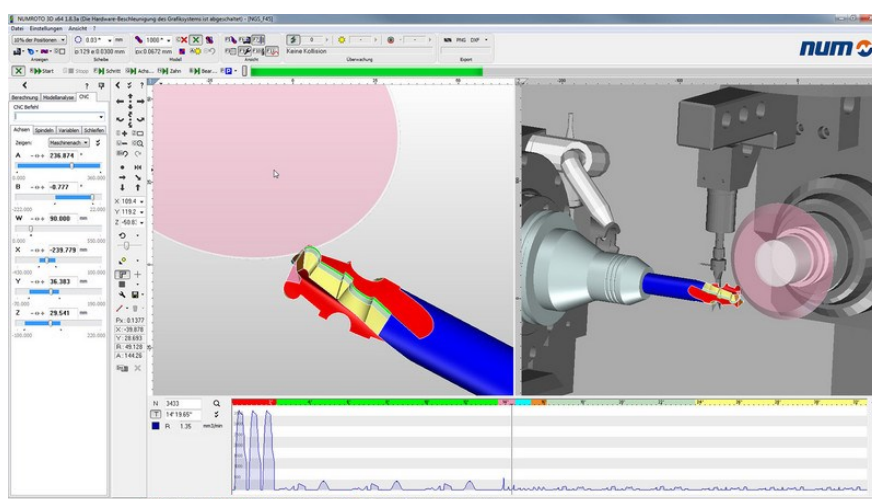
Díky 2D simulaci lze zobrazovat na počítači všechny brousící operace. Řezný nástroj lze pomyslně „řezat,“ respektive zobrazovat průřez v požadované poloze, aby bylo možné vyhodnotit a změřit průřez. Lze odměřovat i detaily o velikosti několika mikrometrů.



Obrázek 74 2D simulace

(Zdroj: [139])

3D simulace věrně zobrazují animace procesu broušení řezného nástroje, také v rámci softwaru jsou monitorovány integrovanými kontrolami kolizí, které lze také plně automatizovat. Ke kolizím může docházet z důvodu uvolněnému brusnému kotouči, kolize s upínacem aj.



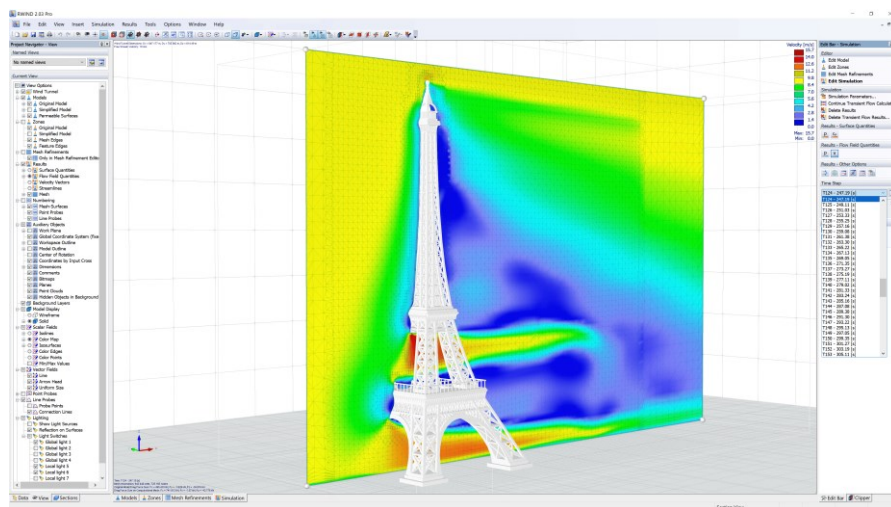
Obrázek 75 3D simulace

(Zdroj: [140])

V *NUMROTO Draw* se obrys nástroje a záhlaví výkresu generují automaticky. Výkresová dokumentace je generována ze stejných dat, která byla skutečně použita k broušení odpovídajícího nástroje. Na výkresové dokumentaci lze zobrazovat i velmi složité nástroje s více řeznými pohledy, také detailní pohledy jakéhokoli druhu z modulu 3D simulace. [138; 139; 140; 141]

9 SOFTWARE PRO INŽENÝRSKOU SIMULACI

Pokud provádíme jisté simulace, tak se můžeme setkat se zkratkou *CAE* (*computer aided engineering*), což v překladu znamená počítačem podporované inženýrství. Tato metoda využívá počítačový software k usnadnění inženýrské analýzy. Zároveň se jedná o další zastřešující rozličné analýzy, používané napříč odvětvími, *FEM* (metoda konečných prvků), *FEA* (analýza konečných prvků), *CFD* (výpočetní dynamiku tekutin), *MBD* (soustavy více těles).



Obrázek 76 Model Eiffelovy věže při numerické simulaci proudění větru v digitálním větrném tunelu

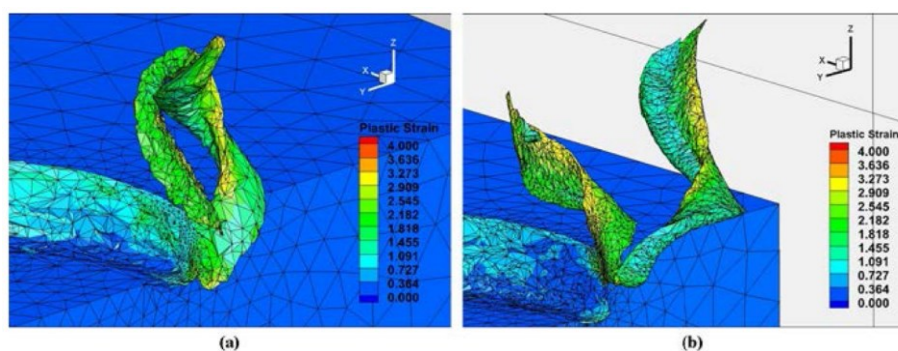
(Zdroj: [142])

Metoda konečných prvků (*MKP*) neboli *Finite Element Method (FEM)* je jedna z nejrozšířenějších inženýrských technik. Jedná se o matematickou metodu používanou k numerickému řešení složitých fyzikálních problémů. Rozkládá složité systémy na menší jednodušší části nazývané konečné prvky. Pomocí matematických rovnic a numerických metod řeší interakce mezi těmito prvky. Cílem je pomocí výpočtu a simulací zjistit, jak by se mohly testované objekty zachovat v reálném prostředí, respektive jak budou reagovat s fyzikálními silami, abychom mohli poté objekty optimalizovat. Máme vícero druhů analýz – analýza mechanických konstrukcí (mosty, budovy, letadla nebo auta), simulace proudění tekutin (zatížení mostu větrem, přestup tepla z kapaliny do konstrukce výměníku či nalezení rychlostního profilu na výstupu z ventilátoru), elektromagnetické analýzy (návrhu transformátorů, elektromotorů nebo antén), tepelné analýzy (simulaci tepelných jevů – zkoumat rozložení teploty, přenos tepla či tepelné zatížení) atp. *FEA* je praktické využití metody konečných prvků. [143; 144; 145]

Simulace mikrofrézování pomocí metody konečných prvků s ohledem na vliv házení nástroje

Studie zabývající se procesem mikrofrézování na hliníkové slitině *Al6082-T6*, při níž byl zkoumán průběh tvorby třísky, rozložení teploty řezného nástroje a řezných sil při frézování drážek.

Predikovaný výsledek mikrofrézování získaný pomocí metody konečných prvků byl porovnán s řadou uskutečněných experimentů. Simulace (metodou konečných prvků) byly uskutečněny za různých řezných podmínek, aby se získaly realistické numerické předpovědi tvorby třísek, rozložení teploty a řezných sil s ohledem na vliv házení nástroje. Konstitutivní model materiálu a jeho konstanty byly stanoveny inverzní metodou na základě experimentálních řezných sil získaných během testů mikrofrézování. Predikční schopnost modelu konečných prvků byla ověřena porovnáním výsledků numerického modelu s experimentálními testy. [146]

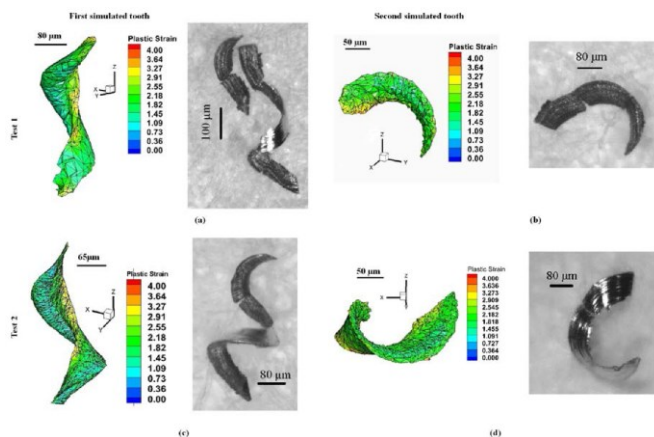


Obrázek 77 Vliv házení na tvorbu třísek při frézování mikrodrážek (a) test 1 a (b) test 2

(Zdroj: [146])

Studie také uvádí významný vliv teploty na pnutí při proudění, které ovlivnilo výsledky predikce řezných sil. Vyšší řezná teplota byla pozorována při vyšší rychlosti posuvu a se záporným úhlem bříty. Maximální rozložení napětí se vyskytlo v kontaktní zóně mezi nástrojem a třískou. [146]

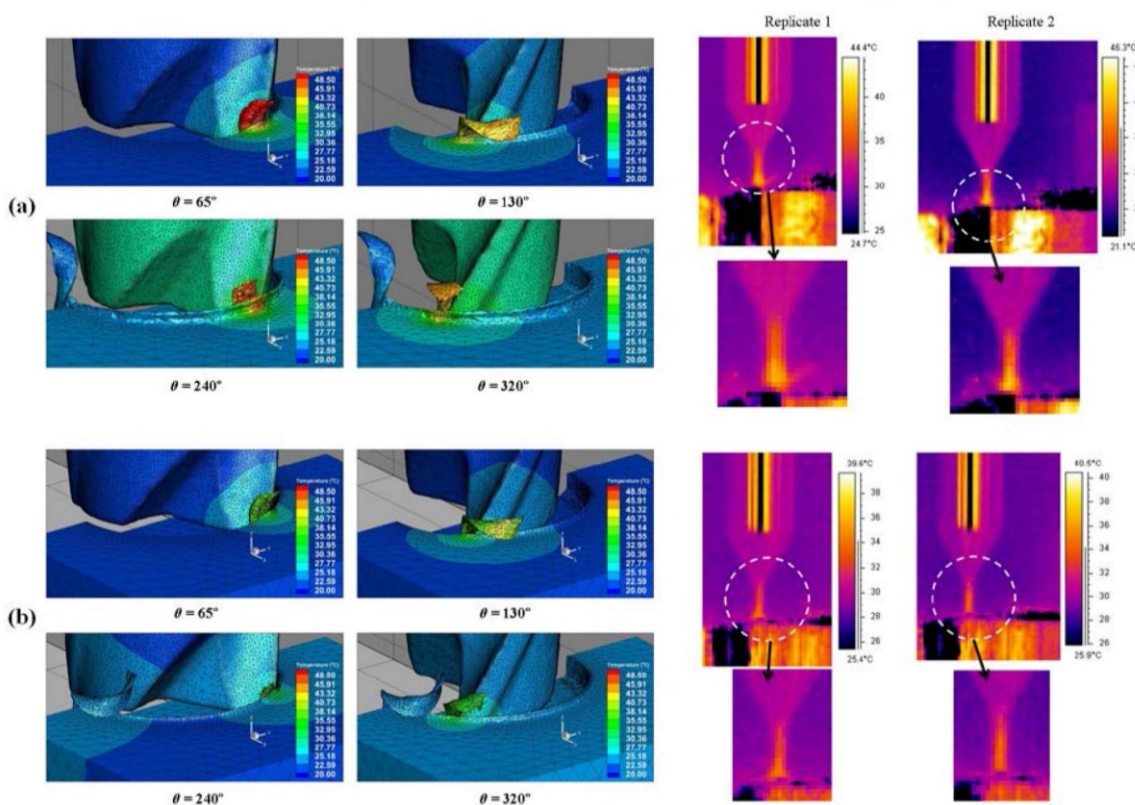
V experimentech i simulacích bylo zjištěno nerovnoměrné zatížení třísky způsobené házením, spolu s různými tvary třísek pro oba záběry zubů. Vyšší teploty byly pozorovány při vysokých posuvech v oblasti poloměru bříty nástroje. Rozložení teploty bylo podél bříty v různých polohách nástroje odlišné. Nejvyšší rozložení teploty bylo detekováno v oblasti třísek. Experimentální rozložení teploty bylo pozorovatelné převážně v oblasti nástroje a bylo v souladu s výsledky simulace.



Obrázek 78 Porovnání predikovaného a získaného tvaru třísky (a, b) test 1 a (c, d) test 2

(Zdroj: [146])

Porovnání simulací a experimentů potvrzuje, že model byl schopen předpovědět hlavní vlastnosti komplexního procesu mikrofrézování hliníkové slitiny. [146]



Obrázek 79 Simulované a experimentální rozložení teplot při mikrofrézování (a) $f_z = 8 \mu\text{m}/(\text{zub} \cdot \text{otáčka})$ a (b) $f_z = 4 \mu\text{m}/(\text{zub} \cdot \text{otáčka})$

(Zdroj: [146])

10 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Teoretická část je zaměřena na principy frézování, obrobitelnost jednotlivých materiálů, popis a rozdělení fréz. Ve stručnosti je popsána technologie týkající se výroby fréz. Následně jsou zmíněny formy a příčiny opotřebení. Důležitým činitelem při návrhu nástroje je použitý materiál, jsou zde popsány jednotlivé materiály a shrnuty jejich vlastnosti. Aby se přispělo k optimalizaci nástroje, potažmo celého procesu obrábění, jsou zde popsány metody, s nimiž se můžeme setkat při nanášení ochranné vrstvy ve formě povlaku, mj. i na řezné nástroje. Dále byly zmíněny ve strojírenství hojně používané *CAD/CAM/CAE* softwary.

II PRAKTICKÁ ČÁST

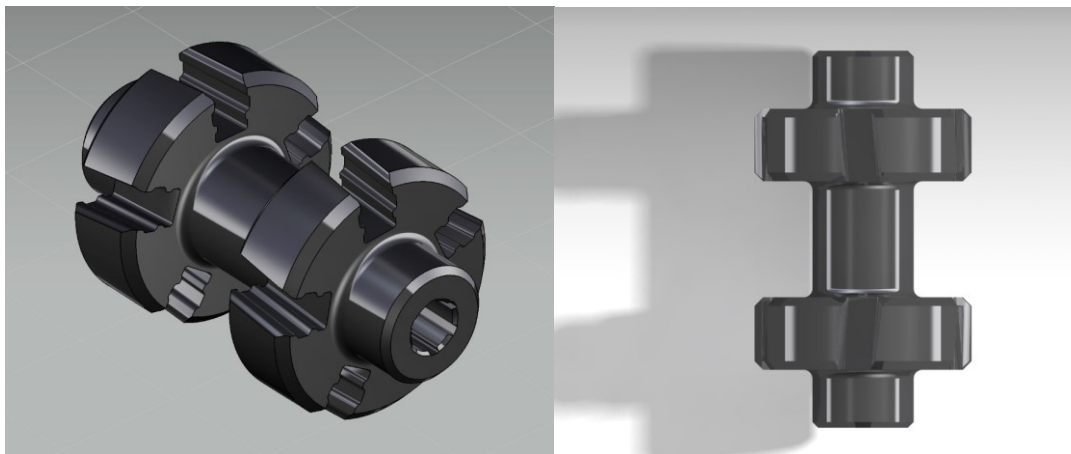
11 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Cílem práce je navrhnout stopkovou frézu. Následně vytvořený návrh přivést k životu ve formě funkčního řezného nástroje. Důležitým aspektem je definovat tvar a materiál obrobku. Onen model obrobku bude vytvořen parametrickým modelováním v *CAD* softwaru. Bude obsahovat tvarovou drážku, která bude odměřena, což bude počátkem výrobního procesu. Výstupem návrhu by mělo být vytvoření obráběcí programu pro výrobu nástroje. Zadáním obráběcího programu a umístěním polotovaru do brousicího stroje bude započat proces výroby, který podléhá technologickému postupu. Po všech brousicích operacích bude nástroj odměřen a výsledky budou porovnány s výrobním výkresem.

Praktická část bude realizována ve společnosti *Ing. Zdeněk Krátký (K-TOOLS)* sídlící v krajském městě Zlín. Společnost se zabývá výrobou nástrojů ze slinutých karbidů. Tato společnost je na trhu již od roku 2000. Kromě výroby standardních řezných nástrojů (fréz, vrtáků) určených do různých materiálů (hliníku, oceli, litiny, plastů, kompozitních materiálů a mnoho dalších) se zabývá výrobou mikronástrojů, tvarových a zakázkových řezných nástrojů. Firma se také zabývá optimalizací vyrobených nástrojů, zákazníkovi jsou předloženy návrhy nástrojů s odlišnou geometrií a také s jiným složením povlaku. Mimo to zde vyrábí menší a střední dílce na 5osých robotizovaných obráběcích centrech, podnik disponuje možností výroby na elektroerozivních drátových řezačkách. Kontrola obrobků probíhá na souřadnicových měřicích strojích, mikroskopech *Keyence* s laserovým skenováním atd. [147]

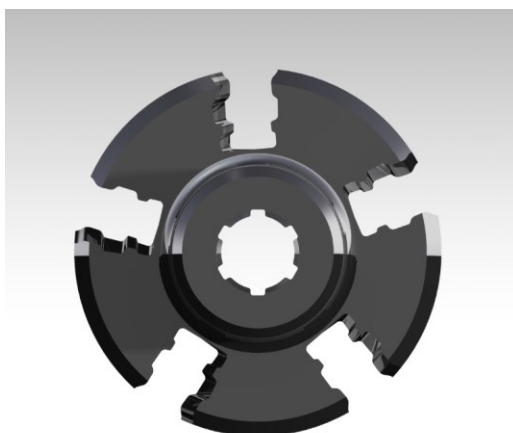
12 VÝCHOZÍ MODEL

Nejprve byl vytvořen rotační model, v programu *Catia V5*, opatřený drážkami. Tento software byl použit z důvodu používání na univerzitě. Tyto tvarové dutiny nesou profil průřezu frézy, drážky by oproti fréze měly být zbytnělé o přídavek na obrábění.



Obrázek 80 Izometrický pohled na model (vlevo) a pohled shora (vpravo)

(Zdroj: vlastní)



Obrázek 81 Pohled zepředu

(Zdroj: vlastní)

Tento počáteční model byl vytvořen hlavně za účelem vytvoření tvarové frézy pro tuto bakalářskou práci a žádné konkrétní využití v technické praxi nenese.

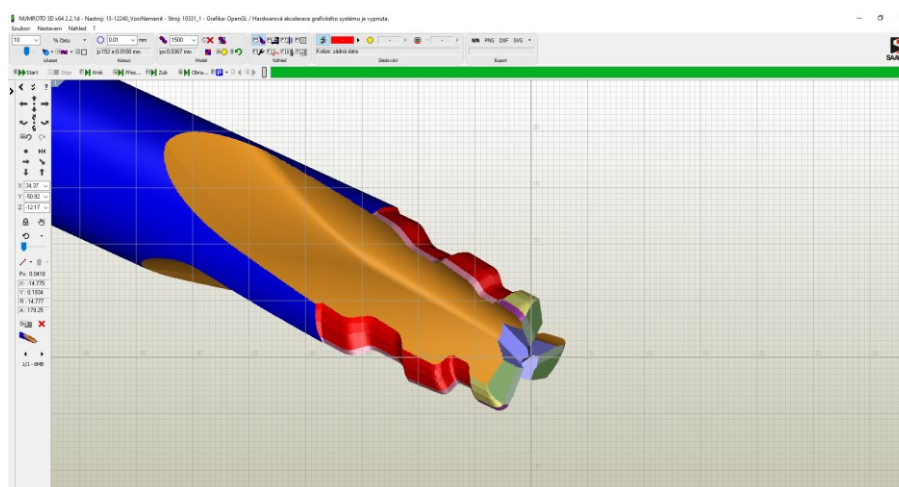
13 NÁVRH FRÉZY

Aby bylo vůbec co vyrábět, musel být proveden konstrukční návrh, a to ve zlínské firmě *K-TOOLS*, která autorovi práce projekt pomohla realizovat. Nejprve musel být brán zřetel na materiál, který má být frézou obráběn, jelikož se jedná sdrúžený (tvarový) nástroj, což je důležité pro jeho životnost (totožný profil nástroje by nemusel dosahovat stejné životnosti např. v nerezové oceli). Obráběný materiál dále ovlivňuje další parametry, řezné úhly, počet zubů apod.

Tabulka 6 Parametry řezného nástroje

Parametry frézy		
Řezný materiál	CKi10	
Axiální úhel čela	1,5°	
Úhel hřbetu	8°	
Úhel čela	Na průměru (nástroje) 9,5 mm	5,4°
	Na průměru (nástroje) 11 mm	10,5°
	Na průměru (nástroje) 11 mm	10,5°
	Na průměru (nástroje) 13,14 mm	16,6°
	Na průměru (nástroje) 14 mm	20°
Povlak	Nitrid zirkonia (ZrN)	
Průměr vnitřního chlazení	1,5 mm	
Počet zubů	3	
Délka drážky	39 mm	
Úhel spirály	10°	

(Zdroj: vlastní)

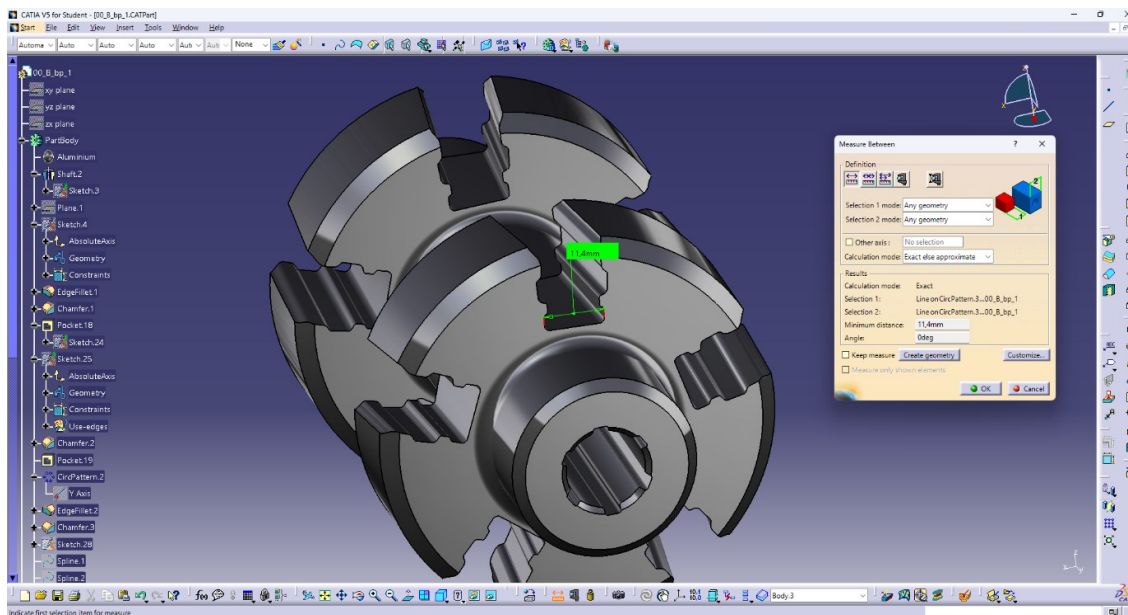


Obrázek 82 3D model tvarové frézy

(Zdroj: vlastní)

13.1 Tvar frézy

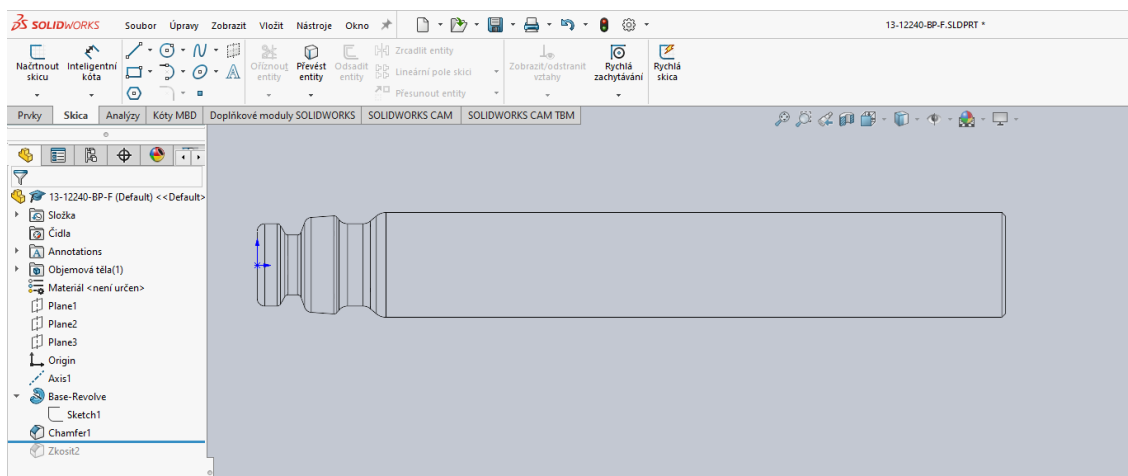
Podle profilu drážky na obrobku, odměřeného ze 3D modelu byl navrhnut tvar frézy, fréza byla zmenšena o čtyři desetiny, z důvodu přídavku. Parametry byly přizpůsobeny volbě obráběného materiálu.



Obrázek 83 Odměřování 3D modelu

(Zdroj: vlastní)

Následně byl zhotoven zjednodušený tvar řezného nástroje v programu *SolidWorks*, z důvodů používání programu společností *K-Tools*.



Obrázek 84 Zjednodušení tvar frézy

(Zdroj: vlastní)

Zadaní trajektorie v *DXF* (*Drawing Exchange Format*) tvaru. Zjednodušeně řečeno došlo k překreslení tvaru frézy. Tato trajektorie následně sloužila jako výchozí bod pro tvorbu obráběcího programu.

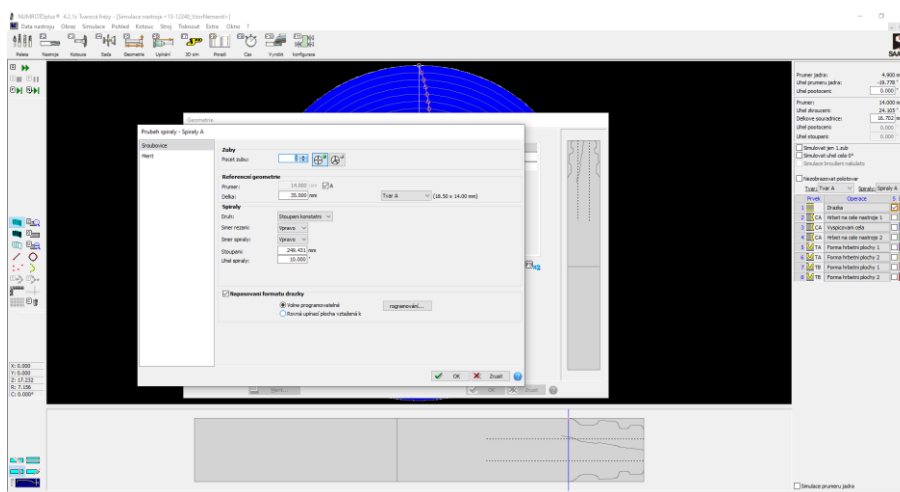


Obrázek 85 Trajektorie v DXF tvaru

(Zdroj: vlastní)

13.2 Volba počtu zubů

U fréz se zpravidla volí počet zubů podle toho, jaký materiál by měl nástroj obrábět. Analogicky počet zubů ovlivní zubovou mezeru. Frézy do hliníku disponují větší zubovou mezerou, kdy dochází ke snadnějšímu odchodu materiálu. V tomto konkrétním případě byly zvoleny tři zuby.

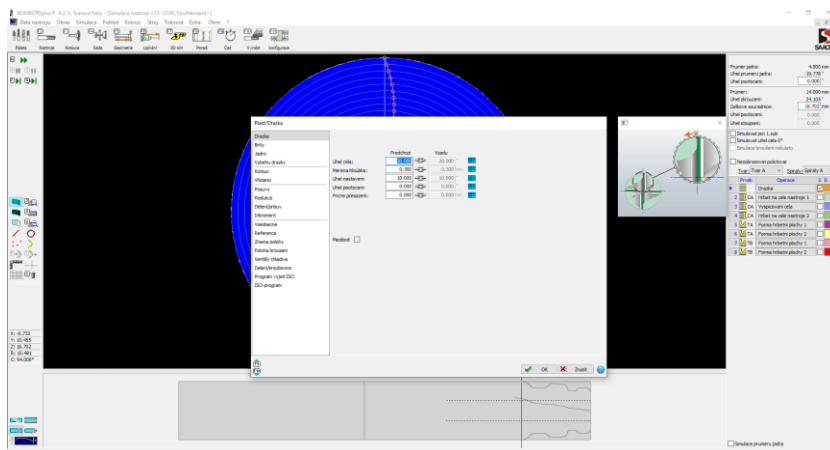


Obrázek 86 Dialogové okno programu Numroto se zvolením počtu zubů a geometrií šroubovice (délka, stoupání, úhel)

(Zdroj: vlastní)

13.3 Stanovení úhlu čela

Standardizovaný úhel čela fréz do hliníku je 15° . Tento fakt byl zahrnut i při tomto návrhu, nicméně tvarový nástroj je pro návrh specifický. U tvarového nástroje se mění průměr, proto došlo k přizpůsobení úhlu čela v závislosti na funkci obráběcího nástroje.

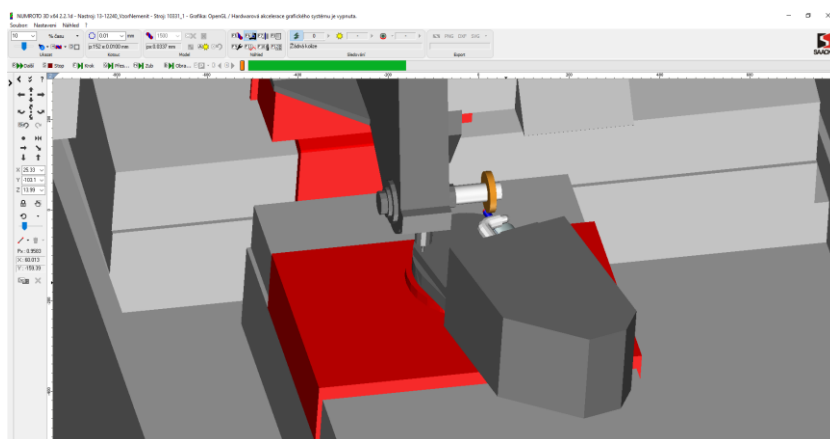


Obrázek 87 Volba úhlu čela

(Zdroj: vlastní)

13.4 Volba drážky

Volba drážky ovlivňuje hned několik aspektů. Při správném zvolení má pozitivní účinky, jedním z nich je například klidný chod frézy. Dále eliminuje axiální síly, zmírňuje vibrace, v neposlední řadě ovlivňuje úhel čela. Obvykle se vyrábí v rozmezí $10\text{--}20^\circ$. U tvarové frézy (v našem případě) je návrh zase o něco složitější a jedná se o komplexní disciplínu, muselo být bráno v potaz, že vlivem tvaru drážky jsou na různých průměrech různé úhly čela.



Obrázek 88 3D simulace výroby drážky

(Zdroj: vlastní)

13.5 Návrh průměru jádra nástroje

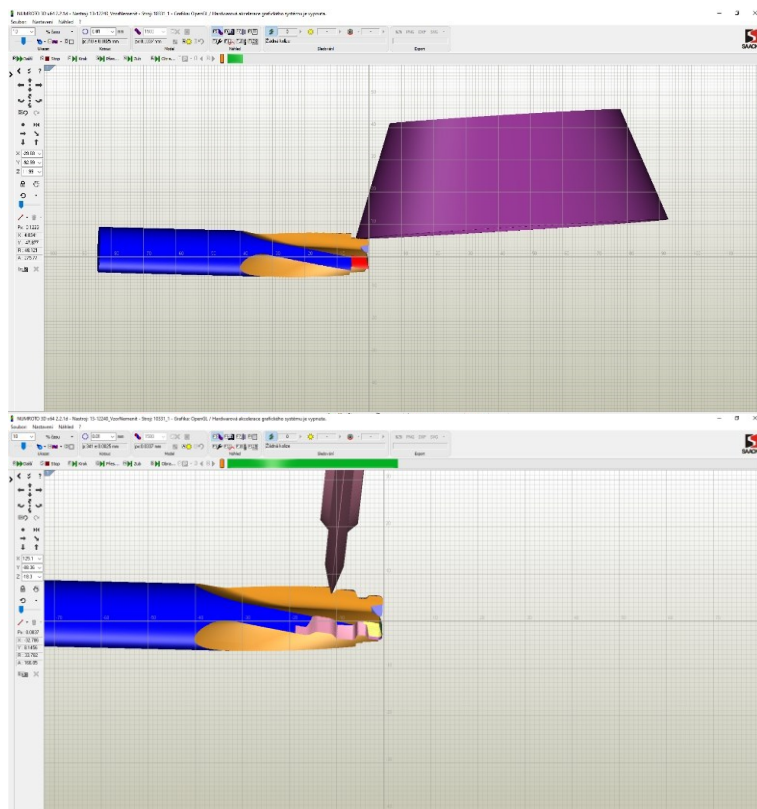
Bylo uvažováno, že nástroj bude výstupem bakalářské práce a podle toho byl také koncipován. Při návrhu této tvarové frézy bylo zohledněno, že nástroj nebude využit ve velkosériové výrobě, nýbrž by měla být otestována maximálně na několika kusech z hliníku nebo hliníkových slitin. Standardizovaný průměr jádra u obvodového frézování je 60 % pracovního průměru. U frézování vnitřních drážek se průměr jádra zmenšuje z důvodu zvětšení zubové mezery. U sdruženého nástroje, kde se průměry mění, se snažíme dosáhnout rozmezí 40–50 %. Jádro volíme dle výpočtu.

$$\left(\frac{\text{průměr jádra}}{\text{průměr frézy}} \right) \cdot 100 = \% \quad (1)$$

$$\left(\frac{4,9}{11} \right) \cdot 100 = 44 \%$$

13.6 Úhel hřbetu a čela

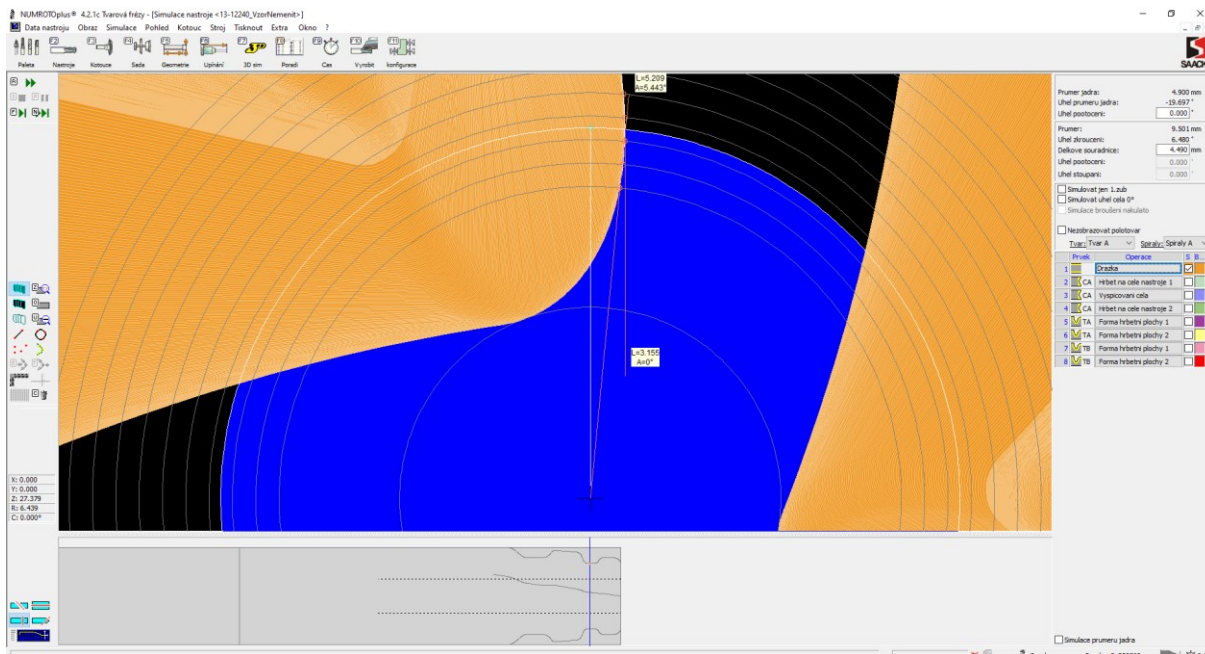
Ideální úhel, který se ve většině případů používá u úhlu hřbetu, je 8°.



Obrázek 89 Broušení hřbetu různými kotouči

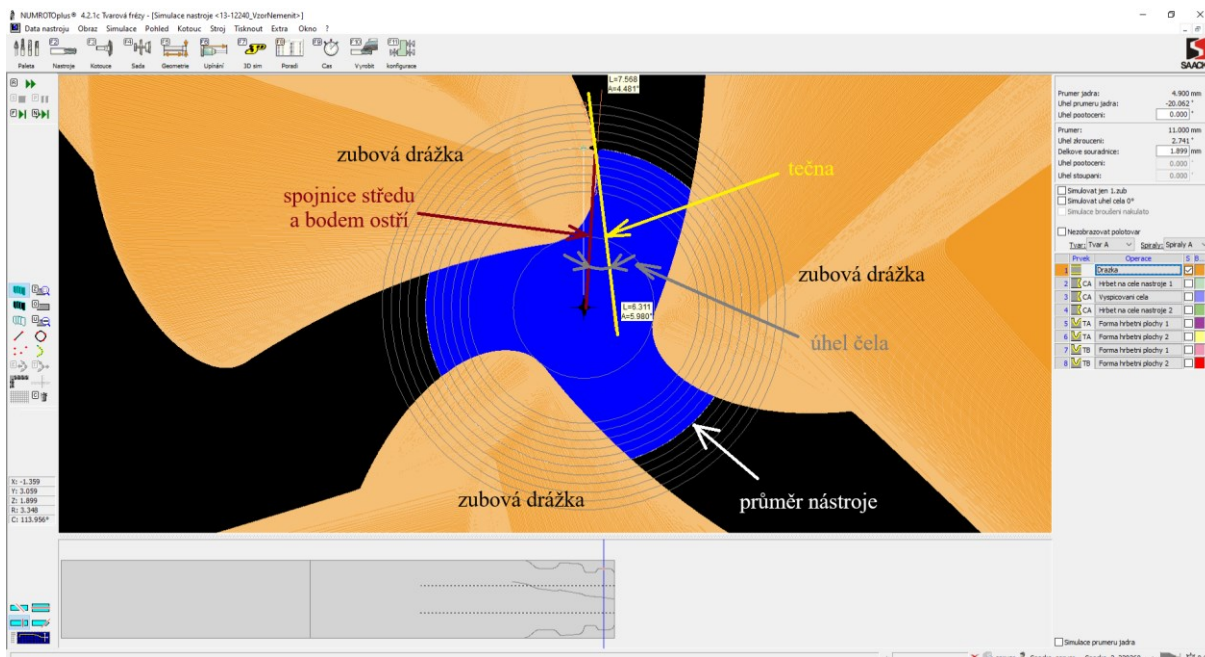
(Zdroj: vlastní)

Podbroušením čela (axiální úhel čela) při volbě úhlu $1,5^\circ$ byla fréza odlehčena ode dna. U čelního frézování by menší úhel měl za příčinu vznik většího tepla, tvoření nárůstků na nástroji a drhnutí nástroje. Větší úhel by byl zřetelný na jakosti obrobené plochy.



Obrázek 90 Řez nástrojem na průměru 9,5 mm – úhel čela $5,4^\circ$

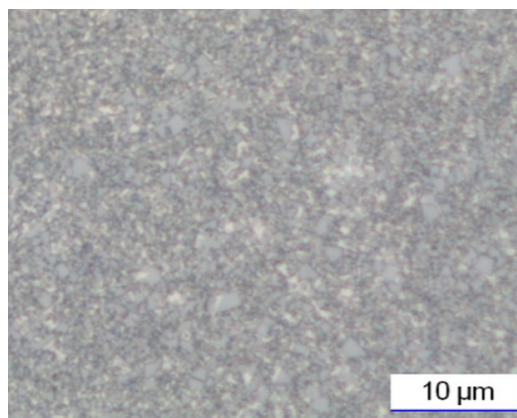
(Zdroj: vlastní)



Obrázek 91 Řez nástrojem na průměru 11 mm – úhel čela $10,5^\circ$

(Zdroj: vlastní)

Jak je z obrázku patrné, při řezu frézou na různých průměrech jsou naměřeny různé úhly čela. To je dáno závislosti úhlu čela na průměru. S klesajícím průměrem klesá i úhel čela. Na tomto nástroji je naměřen úhel čela $5,4^\circ$ na průměru 9,5 mm. Na shodném průměru jsou naměřeny stejné úhly, úhel čela $10,5^\circ$ na průměru 11 mm. Úhel čela $16,6^\circ$ na průměru 13,14 mm. Na průměru 14 mm byl naměřen úhel čela 20° .



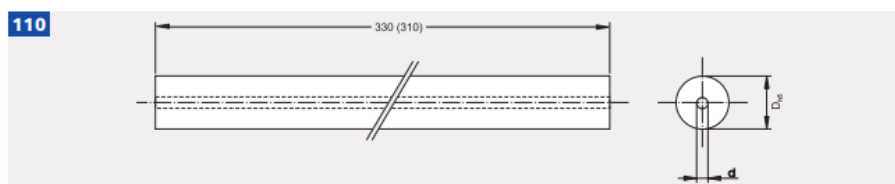
Obrázek 93 1 500krát násobné zvětšení struktury zrna

(Zdroj: [148])

Hartmetall-Rundstäbe
mit zentralem Kühlkanal
geschliffen Tol. h5
Länge 330 (310) mm
Sorte **CKi®10** (K 40 UF)

Carbide round bars
with central coolant hole
ground to tol. h5
length 330 (310) mm
grade **CKi®10** (K 40 UF)

Barreaux carbures ronds
avec trou d'huile central
rectifiés à la tol. h5
longueur 330 (310) mm
en sorte **CKi®10** (K 40 UF)



Durchmesser diameter diamètre D [mm]	Bestell-Nr. order no. référence	Bohrung hole trou d [mm]
4,00	110.0406330.20	0,60
6,00	110.0610330.20	1,00
6,00	110.0618330.20	1,80
8,00	110.0810330.20	1,00
8,00	110.0813330.20	1,30
8,00	110.0820330.20	2,00
8,00	110.0825330.20	2,50
9,00	110.0915330.20	1,50
10,00	110.1010330.20	1,00
10,00	110.1015330.20	1,50
10,00	110.1020330.20	2,00
10,00	110.1030330.20	3,00
12,00	110.1210330.20	1,00
12,00	110.1215330.20	1,50
12,00	110.1220330.20	2,00
12,00	110.1225330.20	2,50
12,00	110.1230330.20	3,00
12,00	110.1240330.20	4,00
12,00	110.1250330.20	5,00
13,00	110.1320330.20	2,00
13,00	110.1330330.20	3,00
14,00	110.1415330.20	1,50
14,00	110.1420330.20	2,00
14,00	110.1425330.20	2,50
14,00	110.1430330.20	3,00
15,00	110.1530330.20	3,00

Fettdruck = Lagerartikel - Weitere Sorten und Abmessungen auf Anfrage.

Bold text = Stock type - Further grades and dimensions upon request.

Impression en caractères gras = Articles en stock - Autres sortes et dimensions d'après demande.

Obrázek 94 Volba materiálu rezného nástroje

(Zdroj: [149])

14.3 Dělení materiálu

Protože se prodávají tyče o délce 330 mm, muselo dojít k dělení na požadovaný rozměr 84 mm. Byla použita pila na slinuté karbidy *Wimmer UFT 200*.



Obrázek 95 Dělení tyče na požadovaný rozměr

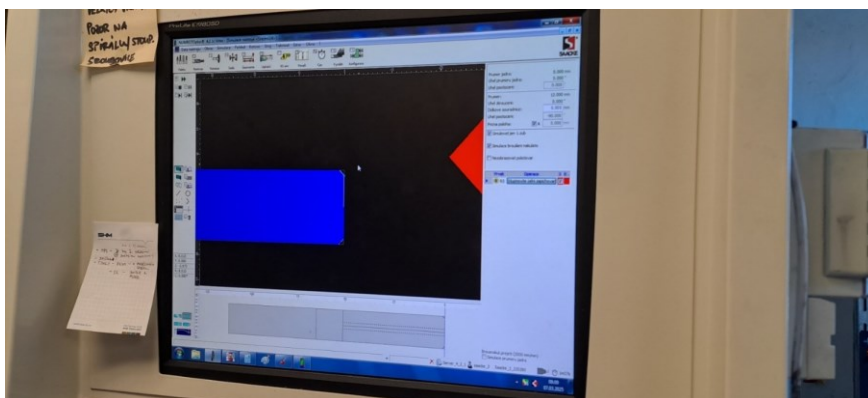
(Zdroj: vlastní)

14.4 Obrábění

Po nařezání tyčového polotovaru se na 5osém brousicím stroji *Saacke UWIF* se uskutečnily následující operace, a sice sražení hrany, hrubování čela, výroba zubové mezery, výroba čela a tvarového profilu.

14.4.1 Sražení hrany

Po nařezání polotovaru na požadovaný rozměr došlo k sražení hrany $0,5 \times 45^\circ$ na straně inverzní k řezné části nástroje neboli na stopce.



Obrázek 96 Zobrazení probíhající operace na displeji stroje

(Zdroj: vlastní)

Po upnutí polotovaru (nejprve byl použit tzv. „najížděcí kus,“ aby mohly být případné rozměry mimo povolené tolerance odstraněny korekcemi programu) do brousičího stroje na řezné nástroje byl proveden dotyk sondy na nulový bod a nastavení trysek.



Obrázek 97 Stanovení nulového bodu

(Zdroj: vlastní)



Obrázek 98 Obrábění

(Zdroj: vlastní)

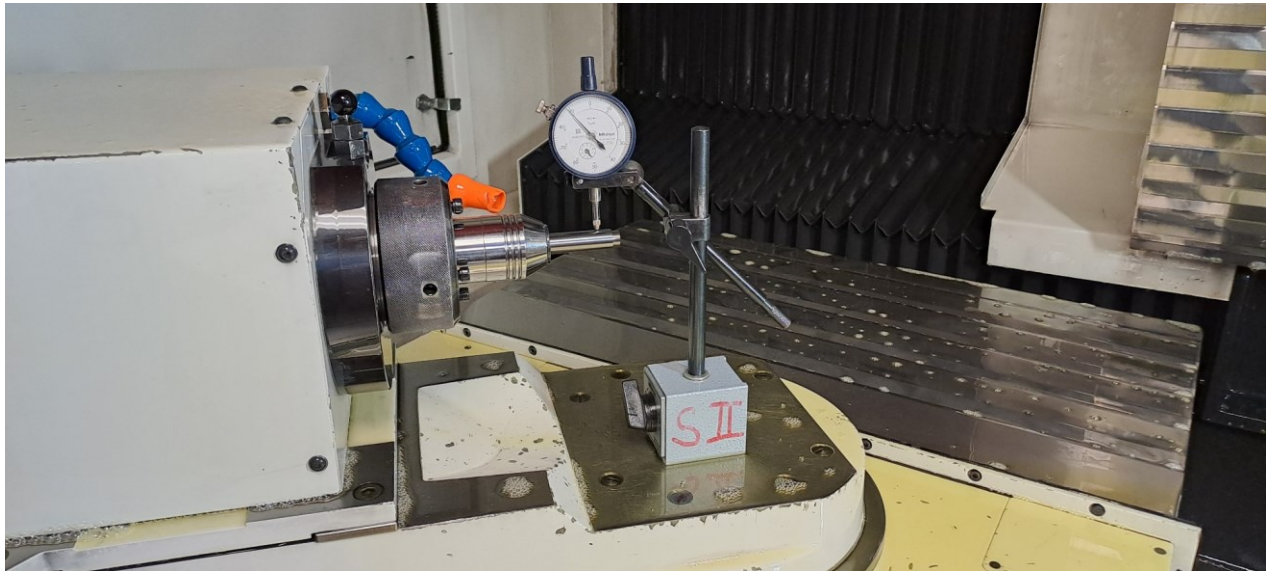


Obrázek 99 Polotovar po první operaci

(Zdroj: vlastní)

14.4.3 Výroba zubové drážky

Po předcházející operaci – hrubování, byl polotovar opět upnut do stroje, byl zjištěn nulový bod dotykovou sondou, zkontrolována házivost úchylkoměrem. Polotovar byl správně upnut, až ručička při rotaci polotovaru nevykazovala žádné nuance. Byly nastaveny trysky a byl spuštěn obráběcí program.



Obrázek 102 Kontrola házivosti

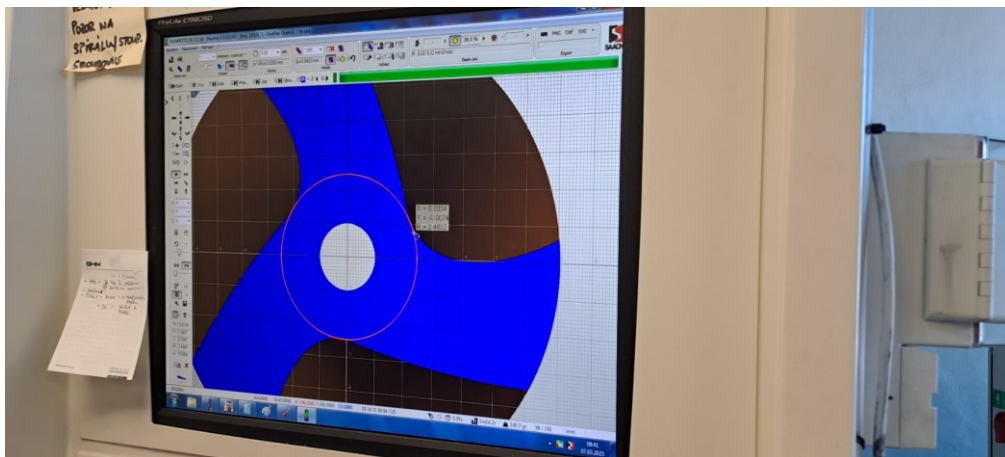
(Zdroj: vlastní)

Po ukončení obráběcího cyklu došlo na kontrolu jádra řezného nástroje na mikroskopu *Zoller pomBasicMicro*.



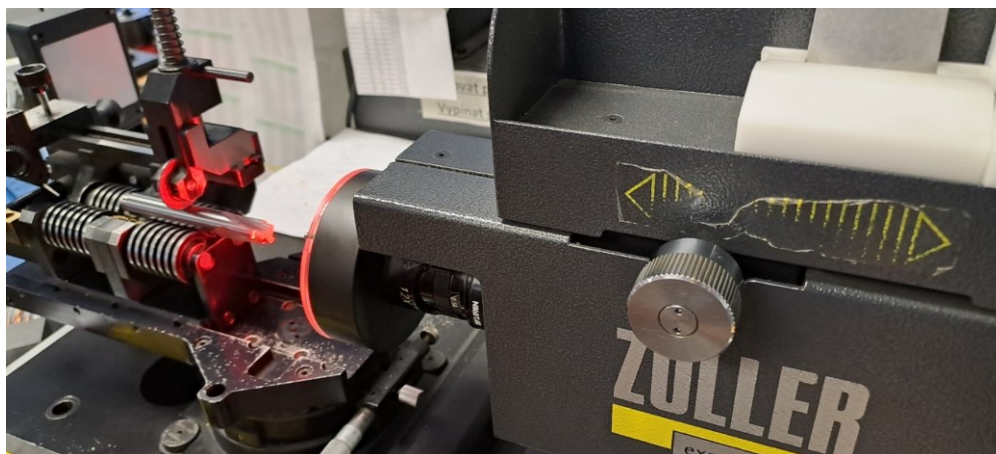
Obrázek 103 Polotovar s hotovou zubovou mezerou

(Zdroj: vlastní)



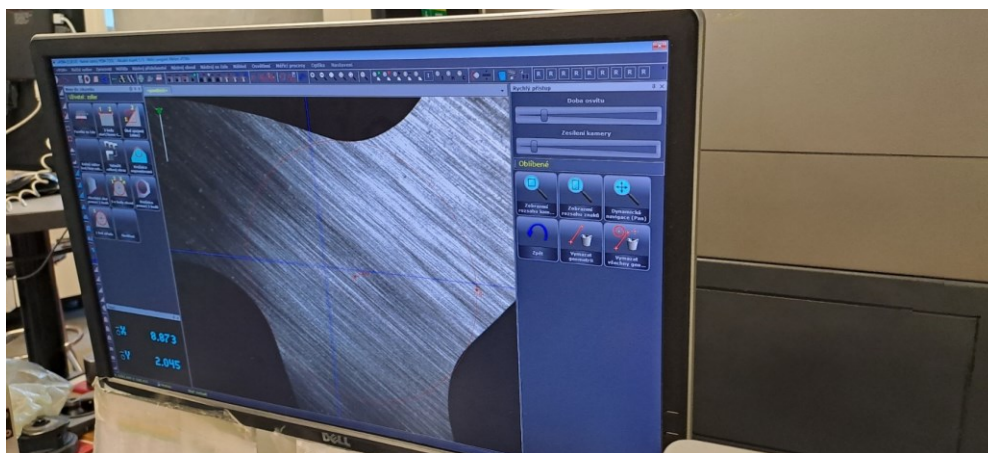
Obrázek 104 Zobrazení jádra na displeji stroje

(Zdroj: vlastní)



Obrázek 105 Měření jádra

(Zdroj: vlastní)

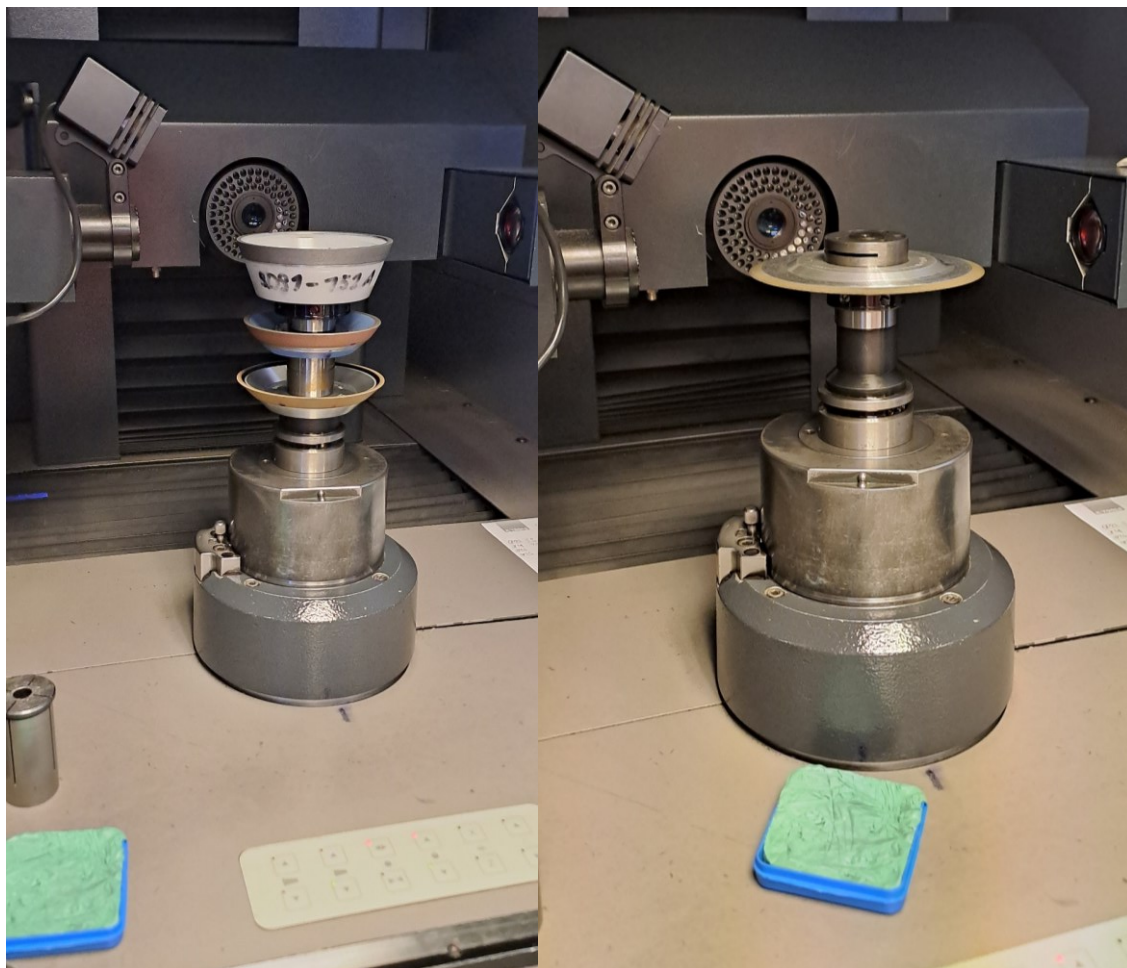


Obrázek 106 Kontrola jádra

(Zdroj: vlastní)

14.4.4 Výroba čela a tvarového profilu

I při této operaci byly zaměřeny dvě sady diamantových kotoučů, aby se zjistilo, jestli mají požadovaný poloměr zaoblení, a jsou tak schopny vyrobit požadovaný úkon.



Obrázek 107 Dvě sady brousících kotoučů určené – na vyšpičkování čela (vlevo) a na definování tvaru profilu (vpravo)

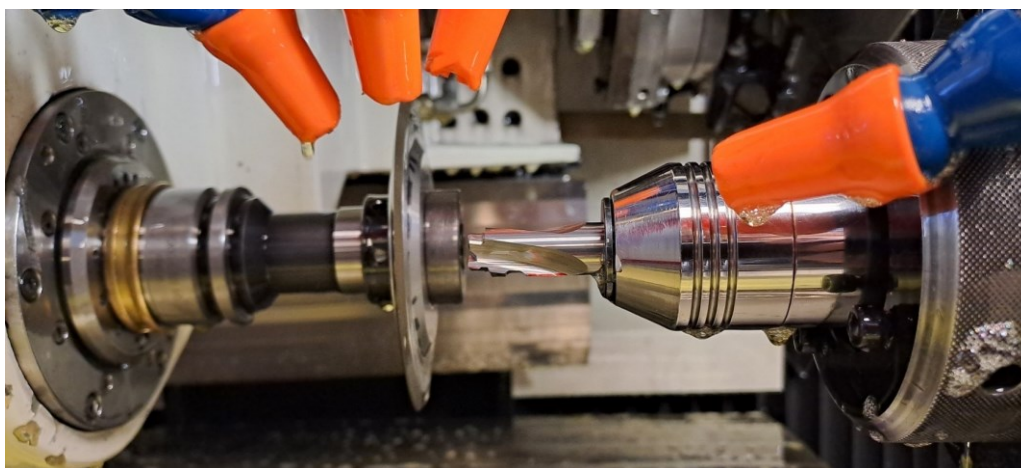
(Zdroj: vlastní)

Poté byl najížděcí (zkušební) kus upnut do upínače obrobku a byla vybroušena geometrie čela, a to tenkým kotoučem, aby se mohl vytáčet při plynulém přechodu zaoblení. Tvarový profil byl broušen jednotlivě zub za zubem. Bylo tak učiněno na najížděcím kusu, aby se případné nepřesnosti daly odstranit korekcí programu. Po odstranění všech nepřesností byla zahájena výroba „ostrých“ kusů. Po výrobě byly frézy odměřeny a naměřené hodnoty byly porovnány s výrobním výkresem.



Obrázek 108 Vyšpičkování čela stopkové frézy

(Zdroj: vlastní)



Obrázek 109 Vytvoření profilu na prvním zubu

(Zdroj: vlastní)



Obrázek 110 Fréza připravená na kontrolu

(Zdroj: vlastní)



Obrázek 111 Kontrola rozměrů frézy přístrojem (nahore) a nasnímané hodnoty (dole)

(Zdroj: vlastní)



Obrázek 112 Najížděcí kus s hotovou geometrií

(Zdroj: vlastní)

14.5 Omílání před povlakem

Omílání se provádí za účelem zvětšení rádiusu na nástroji. Čím delší dobu stráví nástroj v omílacím médiu, tím se mu zvětší rádius. Musel být proveden kompromis mezi ostrostí a stabilitou řezného klínu. Nástroje s nejmenším poloměrem zaoblení se volí pro měkké materiály, jakými jsou např. hliník, plasty, mosaz atd., větší zaoblení se volí např. pro obrábění oceli. Vzhledem k charakteru povahy výroby polotovaru ze slinutých karbidů práškovou metalurgií (kupením zrn) se může stát, že při procesu omílání budou odstraněny, což vede k různým poloměrům zaoblení. Mluvíme-li o stabilitě, je tím myšleno sjednocení rádiusu. Jako kompromis mezi ostrostí a stabilitou pro hliník a jeho slitiny bylo stanoveno zaoblení řezné hrany nástroje na 3 μm . Ideální čas řezného nástroje v omílacím médiu byl stanoven na 30 sekund. Omílání bylo prováděno automaticky robotem konstruovaným firmou *K-TOOLS*. Snímání před omílacím cyklem a po něm bylo provedeno na laserovém mikroskopu *Keyence VK-X1000*. Poté byl nástroj poslán na povlakování, kde bude následně opatřen povlakem *ZrN* naneseným metodou *PVD*.



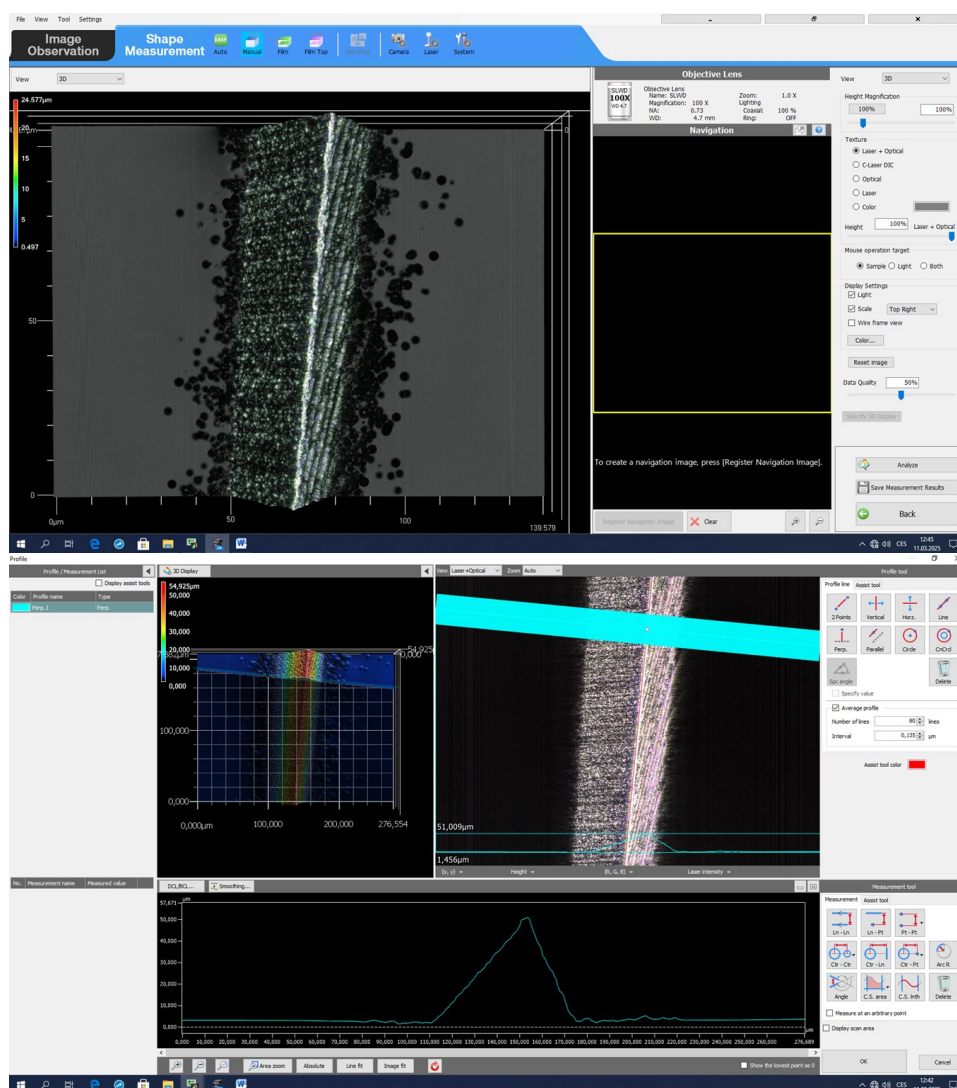
Obrázek 113 Omílání nástroje před povlakem

(Zdroj: vlastní)



Obrázek 114 Snímání řezné hrany mikroskopem

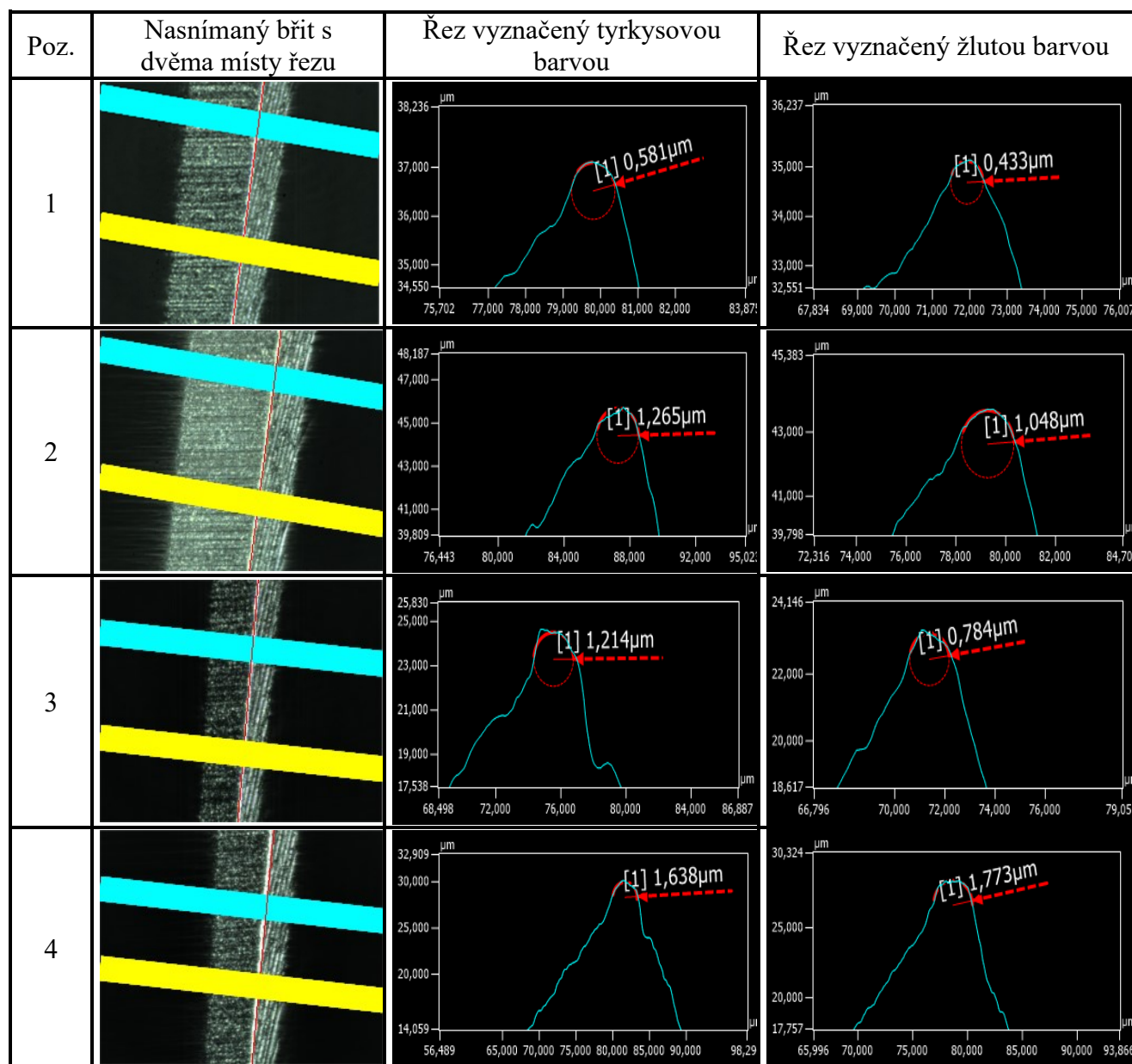
(Zdroj: vlastní)



Obrázek 115 Naskenovaný povrch řezného klínu, bez množiny řezů (nahore), s vyznačeným místem řezu tyrkysovou barvou (dole)

(Zdroj: vlastní)

Tabulka 7 Naměřené hodnoty před povlakem



(Zdroj: vlastní)

Tabulka 8 Podmínky měření

Poz.	Popis naměřených hodnot
1	Měřeno před povlakem, před omíláním, Laser100x-4,7mm
2	Měřeno před povlakem, před omíláním, Laser100x-2,0mm
3	Měřeno před povlakem, 30 s v omílacím prostředku, Laser100x-4,7mm
4	Měřeno před povlakem, 30 s v omílacím prostředku, Laser100x-2,0mm

(Zdroj: vlastní)

Tabulka 9 Poloměr zaoblení v závislosti na době v omílacím prostředku

Podmínky měření	Pozice v tabulce 7	Rádiusy na řezu vyznačeného tyrkysovou barvou [μm]	Rádiusy na řezu vyznačeného žlutou barvou [μm]	Průměr poloměru zaoblení na řezném klínu [μm]
Měřeno před povlakem, před omíláním	1	0,581	0,433	0,507
	2	1,265	1,048	1,157
Měřeno před povlakem, 30 s v omílacím prostředku	3	1,214	0,784	0,999
	4	1,638	1,773	1,706

(Zdroj: vlastní)

Jak je patrné z *tabulky 7*, poloměr zaoblení se skutečně zvětšuje s přibývajícím časem stráveným v omílacím médiu. Mohou ovšem nastat nuance způsobené odrazem světla ostří (zkreslení výsledků, špatné vyhodnocení laserového mikroskopu) nebo absencí zrn odstraněných omílání a tím pádem může dojít ke zkreslení výsledků. Případně během opakovaného měření by mohlo být ostří odměřováno v jiné vzdálenosti než to předešlé, nebo dokonce na jiném zubu.

14.6 Povlak

Nástroj po omílání byl poslán do spolupracující firmy a byl opatřen povlakem typu ZrN , nanášeným metodou *PVD*.



Obrázek 116 Fréza po povlaku

(Zdroj: vlastní)

Nitrid zirkonia (ZrN) se aplikuje tam, kde se vyžaduje vysoká tvrdost, odolnost a chemická stálost.

V oblasti obrábění se ZrN používá jako povrchová úprava nástrojů s dlouhou životností, jako jsou vrtáky, frézy a nože. Řezné nástroje si zachovávají svou ostrost a tvar i při obrábění tvrdých materiálů, jako jsou nerezové oceli a titan.

Uplatnění nalezne mj. i v medicíně, používá pro výrobu implantátů, kloubních náhrad a chirurgických nástrojů. V optice se ZrN používá jako tenkovrstvý povlak na čočkách a zrcadlech. [150]

14.7 Omílání po povlaku

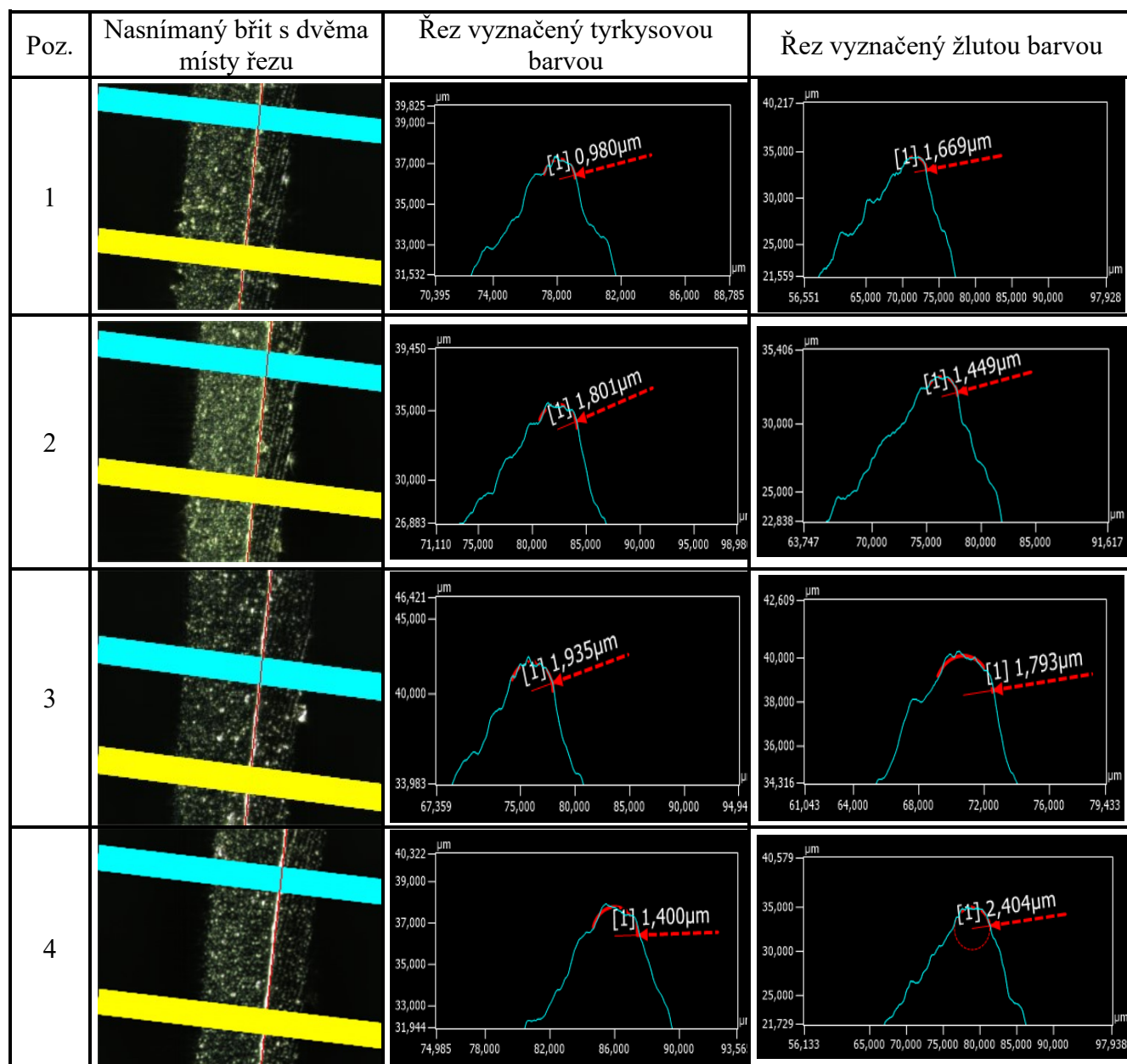
Omílání po povlaku není prováděno primárně za účelem zvětšení rádiusu, nýbrž se provádí ve snaze odstranit mikročástice vzniklé po nanesení povlaku na nástroj, pro eliminaci nerovnoměrného nánosu vrstvy povlaku a zlepšení jakosti povrchu nástroje.



Obrázek 117 Omílání frézy po povlaku

(Zdroj: vlastní)

Tabulka 10 Naměřené hodnoty před povlakem



(Zdroj: vlastní)

Tabulka 11 Podmínky měření

Poz.	Popis naměřených hodnot
1	Měřeno po povlaku ZrN, před zaleštěním, Laser100x-4,7mm
2	Měřeno po povlaku ZrN, před zaleštěním, Laser100x-2,0mm
3	Měřeno po povlaku ZrN, 30 s v omílacím prostředku, Laser100x-4,7mm
4	Měřeno po povlaku ZrN, 30 s v omílacím prostředku, Laser100x-2,0mm

(Zdroj: vlastní)

Tabulka 12 Poloměr zaoblení v závislosti na době v omílacím prostředí

Podmínky měření	Pozice v tabulce 10	Rádusy na řezu vyznačeného tyrkysovou barvou [μm]	Rádusy na řezu vyznačeného žlutou barvou [μm]	Průměr poloměru zaoblení na řezném klínu [μm]
Měřeno před povlakem, před omíláním	1	0,980	1,669	1,325
	2	1,801	1,449	1,625
Měřeno před povlakem, 30 s v omílacím prostředí	3	1,935	1,793	1,864
	4	1,400	2,404	1,902

(Zdroj: vlastní)

Také v tabulce 12 je patrné, že došlo ke zvětšení poloměru zaoblení.

14.8 Zabalení a opatření krabičky štítkem

Posledním krokem před odesláním finálního produktu zákazníkovi je opatření každého nástroje vlastní krabičkou a štítkem.

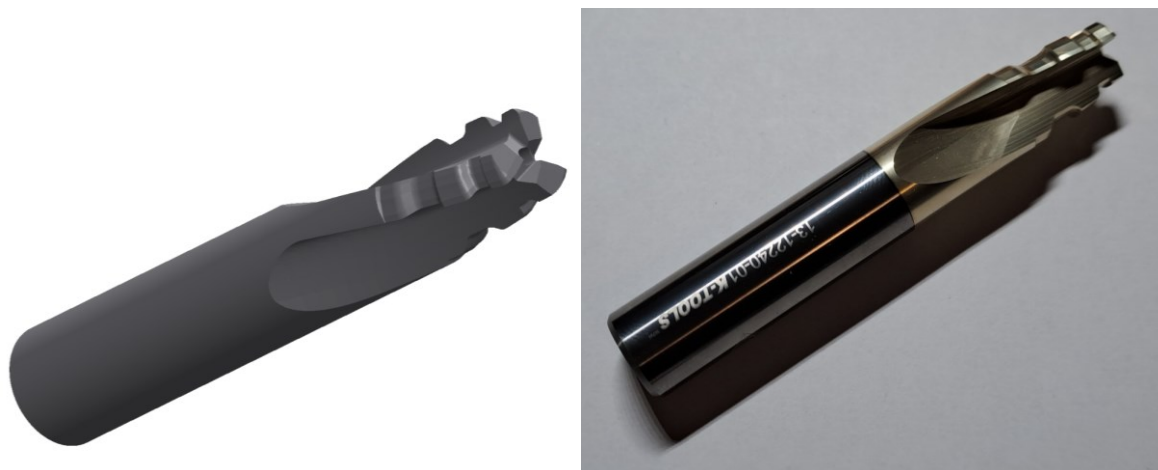


Obrázek 118 Finální produkt

(Zdroj: vlastní)

15 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Zhotovená fréza byla odměřena na optickém bezdotykovém centru *Zoller Genius 3* a porovnána s výrobním výkresem. V příloze *P III: Kontrolní protokol* si můžeme povšimnout, že veškeré naměřené hodnoty splňují dané tolerance.



Obrázek 119 3D model frézy (vlevo) a fyzicky zhotovená fréza (vpravo)

(Zdroj: vlastní)

Optimalizace řezných nástrojů se provádí až po vytvoření nástroje. Vyrobený řezný nástroj se odzkouší, až po prvním obrábění se může spekulovat o formě optimalizace. Při asynchronním úběru třísky by bylo možné změnit počet zubů (pro hliník dva až čtyři). Při zvýšeném hluku způsobeném při obrábění odběrem třísky nástrojem z obrobku by bylo možné změnit úhel čela.

U řezných nástrojů je možná rektifikace. Nástroje se vyrábějí na horní mez tolerance, aby bylo možné je opětovně ostřit. Toto obnovení se, v lepším případě, provádí u výrobce nástroje, který zná parametry nástroje, především šroubovici, která je těžko odměřitelná. Výrobce má možnost aplikovat originální program výroby nástroje a realizovat renovační operaci zadáním korekce programu (zadání úběru). Po přebroušení se opakuje omílání před povlakem, zaslání nástroje na povlak a omílání po naneseném povlaku.

Avšak renovace „projetím“ např. zubové drážky není u tvarových nástrojů možná. Je možný rovnoměrný úběr z čela, příp. hřbetu. Přebroušením nastává posun ostří a zmenšuje se šířka zubu. To má však zanedbatelný vliv na velikost tvaru, řádově jednu setinu.

ZÁVĚR

Cílem závěrečné práce bylo především vytvoření návrhu stopkové frézy, výroba funkčního nástroje, a tak bylo učiněno. V teoretické části bylo provedeno rozdělení fréz podle různých kritérií, bylo uvedeno několik ukázek frézování, se kterými se v technické praxi můžeme setkat. Podstatným prvkem při návrhu frézy je obrobitelnost materiálů určených k obrábění. Byla krátce shrnuta technologie používána při výrobě řezných nástrojů. Bylo uvedeno několik druhů řezných materiálů. V praktické části byl vytvořen model koncepcí *CAD* modelování, podle tohoto *výchozího modelu* byl následně zpracován návrh nástroje. Byl zhotoven výrobní výkres (*Příloha I*) a technologický postup (*Příloha II*), jenž byl průvodcem výroby. Po broušení nastalo omílání. Bylo dokázáno, že délka času, po který se nástroj nachází v omílacím médiu, má vliv na poloměr zaoblení řezného klínu. Nakonec byl výrobek zabalen a opatřen štítkem.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Výrobní inženýrství a technologie*. Univerzita Tomáše Bati, 2014. ISBN 9788074544712.
- [2] Z historie vývoje fréz, frézovacích strojů a frézování. In: *Www.tumlikovo.cz* [online]. 2010 [cit. 2025-05-02]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/z-historie-vyvoje-frez-frezovacich-stroju-a-frezovani/>
- [3] UMC-1000. In: *Www.cnc-inaxes.cz* [online]. 2022 [cit. 2025-05-10]. Dostupné z: https://www.cnc-inaxes.cz/umc-1000_11618
- [4] *Technologie obrábění : CNC soustružení, frézování, vrtání : pro praxi*. Grada Publishing, 2022. ISBN 978-80-271-2883-9.
- [5] Sousedné frézování nebo nesousedné frézování. In: *Sandvik.coromant* [online]. 2012 [cit. 2025-05-10]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/down-milling-vs-up-milling>
- [6] R390-016A16-11L: Čelní fréza pro frézování do rohu CoroMill® 390. In: *Sandvik.coromant* [online]. 2015 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/product-details?c=r390-016a16-11l&m=5745458>
- [7] Преимущества резьбового фрезерования. In: *Rinscom* [online]. 2023 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.rinscom.com/articles/rezbovye-frezy/>
- [8] Zvětšování rozměrů díry frézováním. In: *Sandvik.coromant* [online]. 2012 [cit. 2025-05-10]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/milling-holes-cavities-pockets/widening-a-hole>
- [9] *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [10] *Příručka obrábění*. Hoffman Group, 2016. ISBN 978-3-9818286-2-7.
- [11] *Konstrukční materiály*. EDIS, 2000. ISBN 80-7100-608-4.
- [12] Cryogenic Cooling for precision plastic machining. In: *Ctemag* [online]. 2025 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.ctemag.com/news/cryogenic-cooling-precision-plastic-machining>
- [13] *Polymerní kompozitní materiály*. Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [14] Strojní obrábění dřeva a materiálů na bázi dřeva. In: *Publi* [online]. 2012 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/173/04.html>
- [15] Technologické vlastnosti dřeva. In: *Drevo.celyden* [online]. 2015 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://drevo.celyden.cz/funkn-vlastnosti-deva/technologicke-vlastnosti-dreva/index.html>
- [16] Horní frézka na dřevo. In: *Www.chatar-chalupar.cz* [online]. 2020 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.chatar-chalupar.cz/horni-frezka-na-drevo/>
- [17] Vrchní stopkové frézky, aneb frézování pro každého. In: *Uni-max* [online]. 2019 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.uni-max.cz/clanky-a-video/vrchni-stopkove-frezky-aneb-frezovani-pro-kazdeho-cs/>
- [18] *Frézky, frézy a frézování*. Praha: Průmyslové vydavatelství, 1951.
- [19] *Using a Corner Rounding End Mill on the Lathe* [online]. [cit. 2025-05-16]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=I_rYOu1spks
- [20] *World's First Glass Endmill | Incredible Process!* [online]. [cit. 2025-05-16]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=qHL9zuCE9Ys>
- [21] EA0606. In: *Toolbox* [online]. 2020 [cit. 2025-05-12]. Dostupné z: <https://toolbox.sk/sk/tvrdokovove-frezy-hgt/74036-hgt-ea0606.html>
- [22] EHL1616. In: *Toolbox* [online]. 2020 [cit. 2025-05-12]. Dostupné z: <https://toolbox.sk/sk/tvrdokovove-frezy-hgt/74052-hgt-ehl1616.html>
- [23] 3123 - mandrin pour fraise vissable bt40 type adb g2.5 arrosage. In: *Groupedorise* [online]. 2019 [cit. 2025-05-12]. Dostupné z: <https://www.groupedorise.fr/fr/boutique/mandrins-pour-fraises-a-queue-filetee/3123---mandrin-pour-fraise-vissable-bt40-type-adb-g2-5-arrosage-186866.xhtml>
- [24] Stopková fréza FORCE AD SAD 16 E válcová stopka - PRAMET. In: *Www.karel.cz* [online]. 2022 [cit. 2025-05-02]. Dostupné z: https://www.karel.cz/4989-33292-stopkova-freza-force-ad-sad-16-e-valcova-stopka-pramet.html#/15471-varianta-25a2r033a25_sad16e_c

- [25] Fréza kopírovací kuželová 4 zubá F580718. In: *Www.karel.cz* [online]. 2022 [cit. 2025-05-02]. Dostupné z: https://www.karel.cz/470-4693-freza-kopirovaci-kuzelova-4-zuba-zps-f580718.html#/1955-varianta-1x5_mm
- [26] Frézy válcové čelní krátké, kuželová stopka Morse typ NR, kód 425248, průměr 50 mm. In: *Www.zps-fn.cz* [online]. 2022 [cit. 2025-05-02]. Dostupné z: <https://www.zps-fn.cz/cz/e-shop/detail/frezy-valcove-celni-kratke,-kuzelova-stopka-morse-typ-nr,-kod-425248,-prumer-50-mm/>
- [27] T490 LNK-D40-36-3-M16-13. In: *Webshop.iscar.cz* [online]. 2024 [cit. 2025-05-02]. Dostupné z: <https://webshop.iscar.cz/catalogue/product/1896061>
- [28] MT190T-050G10R02SN12-11.5. In: *Skif-m.net* [online]. 2022 [cit. 2025-05-02]. Dostupné z: <https://skif-m.net/product/frezy-so-smennymi-plastinami/frezerovanie-pazov-i-otrezka/obrabotka-uzkikh-pazov-i-otrezka/mt190t-050g10r02sn12-11.5/>
- [29] Fréza kopírovací válcová čelní na strmém kuželu ISO , ČSN 222299.13. In: *Kovonastroje* [online]. 2020 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.kovonastroje.cz/freza-kopirovaci-valcova-celni-na-strmem-kuželu-iso-csn-222299-13-zps/>
- [30] Válcová fréza s břity ve šroubovici DIN2080 HELICAL AD - PRAMET. In: *Karel* [online]. 2023 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: https://www.karel.cz/5029-47312-valcova-freza-s-brity-ve-sroubovici-din2080-helical-ad-pramet.html#/23467-varianta-50j3r140g50_sad16e80_c
- [31] Frézy na kov- skladový sortiment. In: *Metalplzen* [online]. 2016 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <http://www.metalplzen.cz/frezy-na-kov/>
- [32] Fréza válcová čelní nástrčná, jemnozubá 690275V.030030 30x30 HSS-Co5, typ H. In: *Bo-import* [online]. 2022 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.bo-import.cz/freza-valcova-celni-nastrcna-jemnozuba-690275v-030030-30x30-hss-co5-typ-h-p51810/>
- [33] Válcová čelní fréza DIN1880 HSS-Co8 TiAlN typ HR 80 x 45 mm FORMAT. In: *Bo-import* [online]. 2022 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.bo-import.cz/valcova-celni-freza-din1880-hss-co8-tialn-typ-hr-80-x-45-mm-format-p1453341/>
- [34] Kotoučové frézy s jednostranně zesílenou přírubou Kotoučové frézy s jednostranně zesílenou přírubou. Na povrchu fréz PVD povlak TiN. V centrálním otvoru upínací drážka pro upevnění fréz na hřídeli frézky. In: *Gspzborovice* [online]. 2021 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.gspzborovice.cz/VHM-a-HSS-frezy/Uzke-stranove-a-stredove-frezy-a-frezy-na-klice#lg=1&slide=13>
- [35] SDN D160-1723-40-CALN13. In: *Iscar* [online]. 2023 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://webshop.iscar.cz/catalogue/product/1891885>
- [36] VHM a HSS frézy. In: *Gspzborovice* [online]. 2022 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.gspzborovice.cz/VHM-a-HSS-frezy>
- [37] Fréza kot. DIN885 HSSE polohrubozubá D125x18x40. In: *Mt-nastroje* [online]. 2018 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.mt-nastroje.cz/Freza-kot-DIN885-HSSE-polohrubozuba-D125x18x40-d15398.htm>
- [38] Fréza kot. DIN885 HSSE jemnozubá D125x12x27. In: *Mt-nastroje* [online]. 2018 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.mt-nastroje.cz/Freza-kot-DIN885-HSSE-jemnozuba-D125x12x27-d15315.htm>
- [39] Fréza úhlová čelní jednostranná - 60°x160 mm, HSS, ČSN 222254, F853270. In: *I-nastroje* [online]. 2020 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.i-nastroje.cz/Freza-uhlova-celni-jednostranna-60-x160-mm-HSS-CSN-222254-F853270-d7904.htm>
- [40] Frézy úhlové oboustranné, souměrné, kód 857070, úhel 90°, průměr 80 mm. In: *Zps-fn* [online]. 2021 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.zps-fn.cz/cz/e-shop/detail/frezy-uhlove-oboustranne,-soumerne,-kod-857070,-uhel-90,-prumer-80-mm/>
- [41] Fréza úhlová oboustranná nesouměrná - 85°x 63 mm, HSS, ČSN 222244, F859170. In: *I-nastroje* [online]. 2020 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.i-nastroje.cz/Freza-uhlova-oboustranna-nesoumerna-85-x-63-mm-HSS-CSN-222244-F859170-d7930.htm>
- [42] TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ V PŘÍKLADECH. In: *Fs.vsb* [online]. 2013 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_003/Technologie%20obrabeni%20v%20p%C5%99%C3%ADkladech.pdf
- [43] ChamferCut. In: *Lmt-tools* [online]. 2023 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.lmt-tools.com/en/chamfercut>

- [44] Neue Werkzeuglösungen für die Zahnradherstellung. In: *Fertigung* [online]. 2019 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.fertigung.de/schwerpunkt/motoren-fahrzeugbau/neue-werkzeugloesungen-fuer-die-zahnradherstellung-374.html>
- [45] Wälzschälen und Wälzfräsen einfach programmieren. In: *Klartext* [online]. 2022 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.klartext-portal.de/tipps/programmierung/waelzschaelen-und-waelzfraesen>
- [46] LMT Fette Verzahnen Werkzeuge und Wissen. In: *Lmt-tools* [online]. 2024 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: https://downloads.ctfassets.net/tzrd35jgpyko/1XE9zuYAfSn5NKh0b7DOuG/cdb20ff85cef17ce06cb1d503453a87c/7286612_LMT_Verzahnen_de_screen.pdf
- [47] Fréza čtvrtkruhová vydutá 10 mm. In: *Karel* [online]. 2019 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.karel.cz/6606-freza-ctvrtkruhova-vydata-10-mm.html>
- [48] Fréza půlkruhová vydutá F820070. In: *Karel* [online]. 2019 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: https://www.karel.cz/536-5270-freza-pulkruhova-vydata-zps-f820070.html#/2370-varianta-1_mm
- [49] Fréza půlkruhová vypouklá 7 mm. In: *Karel* [online]. 2019 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.karel.cz/6603-freza-pulkruhova-vypoukla-7-mm.html>
- [50] Fréza válcová čelní dlouhá s 1 břitem přes střed typ W F101405. In: *Karel* [online]. 2019 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: https://www.karel.cz/3756-23872-freza-valcova-celni-dlouha-s-1-britem-pres-stred-typ-w-f101405-zps.html#/16611-varianta-4x45_mm
- [51] Technická fréza tvrdokovová eliptická typ E - TEC-SPIRAL Značka: TEC-SPIRAL. In: *Karel* [online]. 2019 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.karel.cz/1204-14518-technicka-freza-tvrdokovova-elipticka-typ-e.html#/8405-varianta-e0306x03>
- [52] Fréza pro frézování úkosů J(T)-SXP16 - PRAMET. In: *Karel* [online]. 2019 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: https://www.karel.cz/3826-24526-freza-pro-frezovani-ukosu-jt-sxp16-pramet.html#/17131-varianta-45t04r_s35xp1616_c
- [53] Innovative Verzahnungsfräser für höhere Standzeiten. In: *Mav.industrie* [online]. 2011 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://mav.industrie.de/fertigung/innovative-verzahnungsfraeser-fuer-hoehere-standzeiten/#slider-intro-2>
- [54] End Mill Diamond Type. In: *Fatcarbonmaterials* [online]. 2021 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: https://fatcarbonmaterials.com/shop/endmill_carbon_fiber_machining/
- [55] Wählen Sie Ihre Lizenz aus. In: *Alamy* [online]. 2020 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.alamy.de/holzbearbeitung-kopieren-von-shank-router-bits-zwei-fras-oder-formfraser-mit-lager-und-gerader-klinge-oder-mit-auswechselbaren-messern-mit-4-kanten-image348044180.html?imageid=377EC618-A4C9-4CC2-989C-35575B42B70C&p=557209&pn=1&searchId=27118e48a2269b8b3cdb97d6cf1b1ec1&searchtype=0>
- [56] Passgenaue Produktvielfalt. In: *Fertigung* [online]. 2016 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.fertigung.de/tools-more/werkzeuge/passgenaue-produktvielfalt-146.html>
- [57] Břítové destičky. In: *Kovonastroje* [online]. 2023 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.kovonastroje.cz/britove-desticky/>
- [58] Vyměnitelná břítová destička 06 IR M ISO BMA , Carmex. In: *Kovonastroje* [online]. 2023 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.kovonastroje.cz/vymenitelna-britova-desticka-06-ir-m-iso-bma-carmex/>
- [59] Vyměnitelná břítová destička ATORN VCMT 160404-MP5 ACP35T. In: *Hommel-hercules* [online]. 2023 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.hommel-hercules.cz/cs/Shop/1019425122/Vym%C4%9Bniteln%C3%A1-b%C5%99itov%C3%A1-desti%C4%8Dka-ATORN-VCMT-160404-MP5-ACP35T>
- [60] *I Bought the King of Cutters on Ebay. This thing is Awesome!* [online]. [cit. 2025-05-16]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=qi_ksADDF4E
- [61] Фреза регулируемая пазовая CMT D170 d30 B20-39 z4+4(694.022.30). In: *Megafreza* [online]. 2022 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://megafreza.com.ua/product/freza-reguliruemaya-pazovaya-cmt-d170-d30-b20-39-z44694-022-30/>
- [62] Frézování. In: *Eluc.ikap* [online]. 2014 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/lekce/frezovani-2>
- [63] Les définitions des principales opérations de fraisage (planes et profilées). In: *Analyse-fabrication* [online]. 2014 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: https://analyse-fabrication.univ-lille.fr/co/chapitre_2_4_2_3.html

- [64] Milling cutter, groove cutter for professionals and hobbyists. For creating edges. In: *Amazon* [online]. 2020 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.amazon.de/Fr%C3%A4ser-Nutfr%C3%A4ser-Profis-Hobbyisten-Erstellen/dp/B0DCW37B1G>
- [65] 1 Stück Box-Gelenk-Fräser – verstellbar, 5 Klingen, 1/2 Zoll Schaft, 12 mm Schaft, für Holzschneider, Zapfenschneider für Holzbearbeitungswerkzeuge. In: *Aliexpress* [online]. 2021 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://de.aliexpress.com/i/1000004503192.html>
- [66] 1 To 4 Mm Flute End Mill. In: *Indiamart* [online]. 2016 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/flute-end-mill-22069799388.html?pos=5&DualProdcaps>
- [67] Carbide Tipped End Mills Technical Information. In: *Hannibalcarbide* [online]. 2016 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.hannibalcarbide.com/technical-support/end-mills/>
- [68] Carbide 25 mm Helical Thread Mills NPTF Series, SS202. In: *Indiamart* [online]. 2015 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/helical-thread-mills-nptf-series-2854596212448.html>
- [69] HF514SX Multipurpose End Mills With Coolant Hole. In: *7leaders* [online]. 2017 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.7leaders.com/product/1168>
- [70] Additiv gefertigter Scheibenfräser. In: *Zerspanungstechnik* [online]. 2019 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: https://www.zerspanungstechnik.com/bericht/scheibenfraeser/additiv_gefertigter_scheibenfraeser-2019-11-28
- [71] Verlängerte Standzeit durch Funktionsoptimierung. In: *Rosswag-engineering* [online]. 2019 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.rosswag-engineering.de/referenzen/kuehlungsoptimierter-scheibenfraeser/>
- [72] Multifunkční závitové frézy VHM - operace 3 v 1 - technická část. In: *Crstools* [online]. 2018 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://zavitevani.crstools.cz/frezovani-zavitu/frezovani-zavitu-vhm-multifunkcni-3v1/frezovani-zavitu-vhm-multifunkcni-3v1-technicka-cast/>
- [73] Speciální konstrukčně přizpůsobené mikronástroje. In: *Sandvik* [online]. 2020 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/advanced-engineered-micro-tools>
- [74] Mikronástroje. In: *Rotana* [online]. 2019 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.rotana.cz/produkty-rotana#mikronastroje>
- [75] Mikronástroje. In: *Technickytydenik* [online]. 2006 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/mikronastroje_18089.html
- [76] Mikro CNC obrábění: Vše, co potřebujete vědět. In: *At-machining* [online]. 2023 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://at-machining.com/cs/micro-cnc-machining/>
- [77] MARLIN. In: *Zecha* [online]. 2023 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://zecha.shop/webshop/search/search?productsearch=marlin>
- [78] MARLIN 3D LASER SERIES. In: *Zecha* [online]. 2023 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://zecha.de/en/marlin/>
- [79] Mikronástroje optimalizované 3D laserem. In: *Technickytydenik* [online]. 2023 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/obrabeci-stroje-a-jejich-prislusenstvi/mikronastroje-optimalizovane-3d-laserem_57372.html
- [80] Femto laser. In: *Aenium* [online]. 2023 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://aenium.es/femto-laser/>
- [81] FEMTOsecond LASER. In: *Posalux* [online]. 2023 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.posalux.com/technology/femto-laser-micro-machining>
- [82] IGUANA SERIES. In: *Zecha* [online]. 2023 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://zecha.de/en/iguana/>
- [83] IGUANA LASER SERIES. In: *Zecha* [online]. 2023 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://zecha.de/wp-content/uploads/2025/03/IguanaAnwendungsbeispieleEN042025Web-1.pdf>
- [84] *IGUANA MILLING CHALLENGE - Final Measurements* [online]. [cit. 2025-05-16]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=wYHAMZbzdM4&list=PL8jWwgKEPK50Jp7qjJgzzCdufqIFuGLio&index=3>
- [85] IGUANA – 30% Zeitersparnis. In: *Dihawag* [online]. 2022 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://dihawag.ch/de/news/#iguana-30-zeitersparnis>
- [86] *EMO 2023: FRANKEN-FRANKEN Pagode Formfräser* [online]. [cit. 2025-05-16]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=qTkfofVFR24>
- [87] Milling. In: *Mcmaster* [online]. 2020 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.mcmaster.com/products/double-end-end-mills/>

- [88] KEO 931 Solid Carbide End Mill, Ø3/32 x 3/16, Double End, 4 Flute, Stub Length, Square, Uncoated. In: *Archcuttingtools* [online]. 2016 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.archcuttingtools.com/product/873-0093/>
- [89] Cobalt End Mill Double End - 4 Flute Style: HGC-4C. In: *Gfii* [online]. 2024 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.gfii.com/industries/welding-fabrication>
- [90] 2" Inch II 50 mm Head Diameter Fly Cutter for milling & Lathe Machine with Replaceable Carbide Insert bit Indexable Tool. In: *Amazon* [online]. 2023 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.amazon.co.uk/Diameter-milling-Machine-Replaceable-Indexable/dp/B0CBPXXSD3?th=1>
- [91] Frézování dřeva univerzální frézovací hlavou. In: *Igm* [online]. 2016 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://igm.cz/clanky/frezovani-univerzalni-frezovaci-hlavou-na-drevo/>
- [92] CMT Úhlová frézovací hlava s nastavitelným úhlem - D=120 I=40 F=30. In: *Stopkovefrezy* [online]. 2018 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: https://www.stopkovefrezy.cz/CMT-Uhlova-frezovaci-hlava-s-nastavitelnym-uhlem-D-120-I-40-F-30-d13637.htm?gad_source=1&gbraid=0AAAAABmJ3sE-lwXm6CDrQQUwyrMSiuR_U&gclid=EAIaIQobChMI0p6w7fXtjAMVcZJoCR2dChLsEAQYASA BEgLS9PD_BwE
- [93] Mill 4-15™ • Nástrčné frézy • Palcové. In: *Kennametal* [online]. 2021 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.kennametal.com/cz/cs/products/fam.mill-4-15-shell-mill-inch.100008289.html>
- [94] Diamantová frézovací hlava 100x30x48 Z3+3 LH. In: *Stopkovefrezy* [online]. 2018 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.stopkovefrezy.cz/Diamantova-frezovaci-hlava-100x30x48-Z3-3-LH-d7858.htm>
- [95] Frézovací hlava Kraken vyrobená s pomocí technologie aditivní výroby. In: *Dih-hive* [online]. 2018 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.dih-hive.cz/realizovane-projekty/aditivni-technologie/frezovaci-hlava-kraken/>
- [96] Frézovací hlava Kraken z RTI získala zlatou medaili na MSV Brno. In: *Technickytydenik* [online]. 2018 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/denni-zpravodajstvi/frezovaci-hlava-kraken-z-rti-ziskala-zlatou-medaili-na-msv-brno_45218.html
- [97] Frézovací hlava nové generace připomíná chobotnici. In: *Hospodářské noviny* [online]. 2018 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://archiv.hn.cz/c1-66267210-frezovaci-hlava-nove-generace-pripomina-chobotnici>
- [98] OPERAČNÍ TECHNIKA SET NA EXTRAKCI HŘEBŮ. In: *Medin* [online]. 2016 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: https://www.medin.cz/media/cache/file/41/OP037CS-R00_set_na_extraktci_hrebu_2016-10-10_1.pdf
- [99] OPERAČNÍ TECHNIKA HŘEB DO HLEZNA RETROGRÁDNÍ. In: *Medin* [online]. 2016 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: https://www.medin.cz/media/cache/file/05/OP030CS-R00_hreb_do_hlezna_retrogradni_2015-02-18.pdf
- [100] DŘEŇOVÉ FRÉZY. In: *Medin* [online]. 2016 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: https://www.medin.cz/media/cache/file/f0/OP064_R00_CZ.pdf
- [101] Chirurgická frezka C254A.316.012. In: *Hufa* [online]. 2020 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.hufa.cz/chirurgicka-frezka-c254a-316-012/>
- [102] Chirurgická fréza C141AC Allport. In: *Eudent* [online]. 2020 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.eudent.sk/eshop/chirurgicka-freza-c141ac-allport/p-2270017.xhtml>
- [103] Chirurgická fréza RF A. In: *Eudent* [online]. 2020 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.eudent.sk/eshop/chirurgicka-freza-rf-a/p-2279976.xhtml>
- [104] Brousicí stroje na řezné nástroje. In: *Junker-group* [online]. 2018 [cit. 2025-05-15]. Dostupné z: <https://www.junker-group.com/cs/brousici-stroje-junker-a-zema/kategorie-produktu/brousici-stroje-na-rezne-nastroje>
- [105] *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- [106] Что такое поликристаллический алмаз (PCD)? In: *Meetyoucarbide* [online]. 2022 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.meetyoucarbide.com/ru/what-is-polycrystalline-diamond-pcd/>
- [107] What are PCD (Polycrystalline Diamond) Tools? In: *Cuttingtoolschicago* [online]. 2022 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://cuttingtoolschicago.com/pcd-polycrystalline-diamond-tools/>
- [108] Warum beschichten:. In: *Renzelmann-werkzeuge* [online]. 2017 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.renzelmann-werkzeuge.de/leistungen/beschichtung>

- [109] What is PVD coating? In: *Qdmetrology* [online]. 2024 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://qdmetrology.com/what-is-pvd-coating/>
- [110] Nástroje pro třískové obrábění - Jaký povlak je správný? In: *Ceratizit* [online]. 2018 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: https://cuttingtools.ceratizit.com/cz/cs/nastroje/soustru_eni/p_iru_ka/povlak-n_aacute_stroje-pro-tiacuteskoveacute-obraacutebniacute.html
- [111] CVD-Beschichtung. In: *Coating.de* [online]. 2019 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://coating.de/cvd-beschichtung/>
- [112] Ceramic Coatings. In: *Everest-coatings* [online]. 2016 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.everest-coatings.com/ceramic-coatings/cvd-technology>
- [113] Thin Film Diamond by Chemical Vapour Deposition Methods. In: *Www.chm.bris.ac.uk* [online]. 2013 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.chm.bris.ac.uk/pt/diamond/pdf/csr23-21.pdf>
- [114] High-Temperature Chemical Vapor Deposition (HTCVD). In: *Pvatepla-cgs* [online]. 2016 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.pvatepla-cgs.com/en/technologies/high-temperature-chemical-vapor-deposition-htcvd/>
- [115] *Materiály pro řezné nástroje*. MM publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [116] Povlakování nástrojů metodou PACVD. In: *Mmspektrum* [online]. 2008 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/povlakovani-nastroju-metodou-pacvd>
- [117] PVD vs CVD: Mastering Advanced Thin Film Deposition Techniques. In: *Wevolver* [online]. 2024 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.wevolver.com/article/pvd-vs-cvd>
- [118] PLASMA-ENHANCED CHEMICAL VAPOR DEPOSITION (PECVD). In: *Plasmatherm* [online]. 2015 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.plasmatherm.com/process/deposition/pecvd/>
- [119] Introduction. In: *Www.chm.bris.ac.uk* [online]. 2015 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.chm.bris.ac.uk/pt/diamond/jamespthesis/chapter1.htm>
- [120] Hot Filament Chemical Vapor Deposition(HFCVD) System. In: *Bluewavesemi* [online]. 2021 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.bluewavesemi.com/film-deposition-equipment-manufacturer-products-and-services/hot-filament-cvd-system>
- [121] Characterization of cascade arc assisted CVD diamond coating technology Part I. Plasma processing parameters. In: *Nanoproductengineering* [online]. 2004 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: https://nanoproductengineering.com/papers/CACVD_paper_Part_I.pdf
- [122] Laser CVD and Synthesis. In: *Me.gist.ac.kr* [online]. 2020 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: https://me.gist.ac.kr/laser/sub03_01_03.do
- [123] Atomic Layer Deposition (ALD). In: *Iksvacuum* [online]. 2024 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://cz.iksvacuum.com/info/atomic-layer-deposition-ald-17105435275666432.html>
- [124] Co je MOCVD. In: *Rayzeek* [online]. 2023 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.rayzeek.com/cs/glosar/co-je-mocvd?srltid=AfmBOorEns76spDTkR2hYGNxQrqbqrARNln0s9MKutJtx8PHRalgwTY>
- [125] Обзор покрытия PVD. In: *Leadrrp* [online]. 2022 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://leadrrp.net/ru/blog/overview-of-pvd-coating/>
- [126] Life Before the Invention of AutoCAD: Photos from 1950 to 1980. In: *Rarehistoricalphotos* [online]. 2020 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://rarehistoricalphotos.com/life-before-autocad-1950-1980/>
- [127] T-FLEX CAD 15. Инструменты по работе со сборками, чертежами, прикладные инструменты, а также другие возможности системы. In: *Isicad* [online]. 2017 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: https://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=19220
- [128] Autodesk Inventor. In: *Www.inventor3dblog.cz* [online]. 2019 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.inventor3dblog.cz/inventor/>
- [129] Unsere Geschichte über die Jahre hinweg. In: *3ds* [online]. 2021 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.3ds.com/de/about/company/history>
- [130] How CAD Has Evolved Since 1982. In: *Www.scan2cad.com* [online]. 2017 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.scan2cad.com/blog/cad/cad-evolved-since-1982/>
- [131] HISTORY OF COMPUTER AIDED DESIGN. In: *Yeswebim.wordpress.com* [online]. 2015 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://yeswebim.wordpress.com/2015/01/15/history-of-computer-aided-design/>
- [132] *3D modeling will never be the same... (best generative AI tool)* [online]. [cit. 2025-05-16]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=YVd2uQwxULc>

- [133] CAD/CAM Software Advances. In: *Sme* [online]. 2012 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.sme.org/cadcam-software-advances>
- [134] CAM řešení. In: *Solidvision* [online]. 2017 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.solidvision.cz/cam-reseni>
- [135] MIKROPROG F a S (V4). In: *Mikronex* [online]. 2010 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://mikronex.cz/wp-content/uploads/2023/09/MIKROPROG-FS-1.pdf>
- [136] CNC soustružení - Mikroprog. In: *Spszengrova* [online]. 2014 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/CNC-soustru%C5%BEEen%C3%AD-UT.pdf>
- [137] TOP 5 tips to become a Master CNC Machine Programmer | DVF 5000 5 Axis Mill [online]. [cit. 2025-05-16]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=RPxSVm5ZTnw&t=654s>
- [138] Benefits of SIGSpro. In: *Schutteusa* [online]. 2018 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://schutteusa.com/grinding-machines/sigspro/>
- [139] NUMROTOplus. In: *Num* [online]. 2019 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.num.com/complete-solutions/numroto/numrotoplus>
- [140] 3D Simulation and 3D Collision Monitoring. In: *Num* [online]. 2019 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.num.com/complete-solutions/numroto/numroto-3d>
- [141] COMPLETE SOLUTION IN TOOL GRINDING. In: *Num* [online]. 2019 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: https://www.num.com/fileadmin/documents/Gesamtloesungen/NUMROTO_Brochure_2024_EN_vie w.pdf
- [142] RWIND 3 Simulace větru. In: *Www.dlupal.com* [online]. 2024 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.dlupal.com/cs/produkty/samostatn%C3%A9%20programy/rwind>
- [143] Co je to CAE? In: *Appliedfem* [online]. 2019 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.appliedfem.cz/faq/co-je-to-cae>
- [144] Technické analýzy a simulace. In: *Axiomtech* [online]. 2023 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.axiomtech.cz/24761-technicke-analyzy-a-simulace>
- [145] Finite Element Method – What Is It? FEM and FEA Explained. In: *Simscale* [online]. 2024 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.simscale.com/blog/what-is-finite-element-method/>
- [146] 3D Finite Element Simulation of Micro End-Milling by Considering the Effect of Tool Run-Out. In: *Mdpi* [online]. 2017 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2072-666X/8/6/187#B16-micromachines-08-00187>
- [147] K-TOOLS [online]. 2025 [cit. 2025-05-15]. Dostupné z: <https://www.k-tools.cz/>
- [148] CKi@10 carbide. In: *Ihle* [online]. 2018 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://www.ihle.com/en/hartmetalle-sorten.php?ac=3>
- [149] Lieferprogramm Delivery programme Programme de livraison. In: *Ihle* [online]. 2019 [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: https://www.ihle.com/pdf/Ihle_Lieferprogramm_aktuell-min.pdf
- [150] Nitrid zirkonia. In: *Brousky* [online]. 2022 [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://brousky.cz/slovník-pojmu/nitrid-zirkonia/>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Frézovací stroj z devatenáctého století (vlevo) a 5osé frézovací centrum UMC-1000 (vpravo).....	15
Obrázek 2 Sousledné a nesousledné frézování	17
Obrázek 3 Rampování.....	19
Obrázek 4 Frézování vnitřního (vlevo) a vnějšího závitu (vpravo)	19
Obrázek 5 Postupné zahlubování se šroubovicovou interpolací (vlevo) a frézování s kruhovou interpolací (vpravo)	20
Obrázek 6 Kryogenní chlazení pro přesné obrábění plastů	28
Obrázek 7 Frézování drážky (vlevo), frézy do dřeva.....	29
Obrázek 8 Použití tvarové frézy na soustruhu	30
Obrázek 9 Skleněná fréza před dotykem s obrobkem (vlevo) a po dotyku (vpravo)	30
Obrázek 10 Označení a pojmy u frézovacího nástroje	31
Obrázek 11 Označení úhlů fréz.....	32
Obrázek 12 Názvosloví kotoučové oboustranné frézy	33
Obrázek 13 Vliv kladného a záporného úhlu čela při frézování tenkostěnných součástí....	34
Obrázek 14 Stopkové frézy, dvouzubá (nahore), šestizubá (dole)	37
Obrázek 15 Trn pro frézy se závitem.....	38
Obrázek 16 Stopková fréza s VBD (vlevo), fréza kopírovací kuželová (vpravo)	38
Obrázek 17 Frézy válcové čelní krátké, kuželová stopka Morse typ NR (nahore), tatáž fréza zobrazená schématicky (dole).....	38
Obrázek 18 Frézy se závitem	39
Obrázek 19 Fréza kopírovací válcová čelní (vlevo), válcová fréza s břity ve šroubovici (vpravo).....	39
Obrázek 20 Fréza válcová nástrčná jemnozubá se zuby v levé šroubovici	40
Obrázek 21 Fréza válcová čelní nástrčná, jemnozubá (vlevo) a válcová čelní fréza DIN1880 HSS-Co8 s povlakem TiAlN (vpravo).....	41
Obrázek 22 Kotoučové frézy s jednostranně zesílenou přírubou	41
Obrázek 23 Kotoučová fréza oboustranná s VBD	42
Obrázek 24 Fréza kotoučová DIN885 HSSE polohrubozubá (vlevo) a jemnozubá (vpravo)	42
Obrázek 25 Úhlová čelní fréza jednostranná	43
Obrázek 26 Úhlová fréza oboustranná, souměrná	43
Obrázek 27 Fréza úhlová oboustranná, nesouměrná – úhel 85°	44
Obrázek 28 Modulová fréza pro přímé vnější ozubení.....	44
Obrázek 29 Výroba vnitřního a vnějšího ozubení tvarovou nástrčnou frézou	44

Obrázek 30 Fréza čtvrtkruhová konkávní (vlevo), půlkruhová konkávní (uprostřed), půlkruhová konvexní (vpravo).....	45
Obrázek 31 Fréza válcová čelní dlouhá s 1 břitem přes střed (vlevo), technická fréza tvrdokovová eliptická typ E (vpravo)	45
Obrázek 32 Fréza pro frézování úkosů (vlevo), tvarové frézy (vpravo).....	45
Obrázek 33 Stopková fréza s geometrií určenou pro obrábění uhlíkových vláken a sklolaminátu.....	47
Obrázek 34 Tvarová fréza do dřeva s vyměnitelnými břity	47
Obrázek 35 Fréza s destičkami ze slinutého karbidu, natvrdo připájenými	47
Obrázek 36 Nabídka rozličných typů vyměnitelných břitových destiček	48
Obrázek 37 Sada vyměnitelných břitových destiček 06 IR M ISO BMA, Carmex	48
Obrázek 38 Břítová destička ze slinutého karbidu	48
Obrázek 39 Stopková fréza s VBD ve šroubovici	49
Obrázek 40 Nastavitelná fréza	49
Obrázek 41 Složené frézy	50
Obrázek 42 Složené frézy	50
Obrázek 43 Nastavitelná fréza	51
Obrázek 44 Stopková fréza bez vnitřního chlazení	51
Obrázek 45 Stopková fréza s centrálním chlazení určená pro frézování závitů	52
Obrázek 46 Stopková fréza, povlakovaná, čtyřzubá, s vnitřním chlazením.....	52
Obrázek 47 Boční frézování (vlevo), frézování drážek (uprostřed) a T-drážek (vpravo) ...	52
Obrázek 48 Kotoučová fréza vyrobená aditivními technologiemi	53
Obrázek 49 Výrobní postup	54
Obrázek 50 Mikronástroje	54
Obrázek 51 Mikronástroje	55
Obrázek 52 Nástroje MARLIN různých sérií.....	55
Obrázek 53 Tvarová fréza (vlevo) a frézování obrobku (vpravo)	56
Obrázek 54 Oboustranná fréza KEO 931 (nahore) a HGC-4C (dole).....	57
Obrázek 55 Letmá fréza.....	57
Obrázek 56 Vytvoření různých tvarů profilovými noži na jedné hlavě	58
Obrázek 57 Úhlová frézovací hlava s nastavitelným úhlem.....	58
Obrázek 58 Frézovací hlava s VBD (vlevo), frézovací hlava s pájenými zuby (vpravo) ...	59
Obrázek 59 Frézovací hlava Kraken.....	59
Obrázek 60 Použití flexibilní frézy	60
Obrázek 61 Sada flexibilních fréz	60

Obrázek 62 Chirurgická fréza C254A (vlevo), chirurgická fréza C141AC Allport (uprostřed), chirurgická fréza RF A (vpravo)	61
Obrázek 63 Brousíci stroje na řezné nástroje.....	62
Obrázek 64 Řezné nástroje opatřené povlakem	68
Obrázek 65 Nanostrukturovaný fraktální povlak z TiO ₂ (vlevo), řez drátem průměru 25 μm, který byl potažen povlakem pomocí HFCVD (vpravo)	69
Obrázek 66 Konstrukční kanceláře před nástupem CAD softwarů	72
Obrázek 67 Helikoptéra vytvořená v T-FLEX CAD	72
Obrázek 68 Program CATIA v osmdesátých letech dvacátého století	74
Obrázek 69 Zadaní požadavku v textové formě (vlevo nahoře), nabídka čtyř variant vytvořených modelů (vpravo nahoře), vybraná varianta (vlevo dole) a vytisknutý model na 3D tiskárně (vpravo dole)	74
Obrázek 70 Simulace soustružení v programu Mikroprog S	75
Obrázek 71 CAM simulace a tvorba obráběcího programu	75
Obrázek 72 Aplikace na skutečné součásti	76
Obrázek 73 Náhled do programu Numroto.....	76
Obrázek 74 2D simulace	77
Obrázek 75 3D simulace	77
Obrázek 76 Model Eiffelovy věže při numerické simulaci proudění větru v digitálním větrném tunelu.....	78
Obrázek 77 Vliv házení na tvorbu třísek při frézování mikrodrážek (a) test 1 a (b) test 2 ..	79
Obrázek 78 Porovnání predikovaného a získaného tvaru třísky (a, b) test 1 a (c, d) test 2 ..	80
Obrázek 79 Simulované a experimentální rozložení teplot při mikrofrézování (a) $f_z = 8 \mu\text{m}/(\text{zub} \cdot \text{otáčka})$ a (b) $f_z = 4 \mu\text{m}/(\text{zub} \cdot \text{otáčka})$	80
Obrázek 80 Izometrický pohled na model (vlevo) a pohled shora (vpravo)	84
Obrázek 81 Pohled zepředu	84
Obrázek 82 3D model tvarové frézy	85
Obrázek 83 Odměřování 3D modelu	86
Obrázek 84 Zjednodušení tvar frézy	86
Obrázek 85 Trajektorie v DXF tvaru	87
Obrázek 86 Dialogové okno programu Numroto se zvolením počtu zubů a geometrií šroubovice (délka, stoupání, úhel)	87
Obrázek 87 Volba úhlu čela.....	88
Obrázek 88 3D simulace výroby drážky	88
Obrázek 89 Broušení hřbetu různými kotouči	89
Obrázek 90 Řez nástrojem na průměru 9,5 mm – úhel čela 5,4°	90
Obrázek 91 Řez nástrojem na průměru 11 mm – úhel čela 10,5°	90

Obrázek 92 Výrobní výkres	92
Obrázek 93 1 500krát násobné zvětšení struktury zrna	93
Obrázek 94 Volba materiálu rezného nástroje.....	93
Obrázek 95 Dělení tyče na požadovaný rozměr	94
Obrázek 96 Zobrazení probíhající operace na displeji stroje	94
Obrázek 97 Stanovení nulového bodu	95
Obrázek 98 Obrábění	95
Obrázek 99 Polotovar po první operaci	95
Obrázek 100 Zaměření kotouče	96
Obrázek 101 Polotovar po hrubování	96
Obrázek 102 Kontrola házivosti	97
Obrázek 103 Polotovar s hotovou zubovou mezerou	97
Obrázek 104 Zobrazení jádra na displeji stroje	98
Obrázek 105 Měření jádra	98
Obrázek 106 Kontrola jádra.....	98
Obrázek 107 Dvě sady brousících kotoučů určené – na vyšpičkování čela (vlevo) a na definování tvaru profilu (vpravo)	99
Obrázek 108 Vyšpičkování čela stopkové frézy.....	100
Obrázek 109 Vytvoření profilu na prvním zubu.....	100
Obrázek 110 Fréza připravená na kontrolu.....	100
Obrázek 111 Kontrola rozměrů frézy přístrojem (nahore) a nasnímané hodnoty (dole)...	101
Obrázek 112 Najížděcí kus s hotovou geometrií	101
Obrázek 113 Omílání nástroje před povlakem	102
Obrázek 114 Snímání rezné hrany mikroskopem.....	103
Obrázek 115 Naskenovaný povrch rezného klínu, bez množiny řezů (nahore), s vyznačeným místem řezu tyrkysovou barvou (dole)	103
Obrázek 116 Fréza po povlaku	105
Obrázek 117 Omílání frézy po povlaku.....	106
Obrázek 118 Finální produkt	108
Obrázek 119 3D model frézy (vlevo) a fyzicky zhotovená fréza (vpravo)	109

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Přehled vývoje materiálů z historického hlediska	23
Tabulka 2 Úhly čela zubů čelních fréz při rozličných řezných i obráběných materiálech ..	35
Tabulka 3 Úhly hřbetu pro rozdílné druhy frézovaných materiálů	36
Tabulka 4 Dosahované přesnosti obrobených ploch	62
Tabulka 5 Charakteristiky aplikací rychlořezných ocelí	64
Tabulka 6 Parametry řezného nástroje	85
Tabulka 7 Naměřené hodnoty před povlakem	104
Tabulka 8 Podmínky měření	104
Tabulka 9 Poloměr zaoblení v závislosti na době v omílacím prostředku	105
Tabulka 10 Naměřené hodnoty před povlakem	107
Tabulka 11 Podmínky měření	107
Tabulka 12 Poloměr zaoblení v závislosti na době v omílacím prostředku	108

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

°	Stupně
°C	Stupně Celsia
2D	Dvojměrný prostor
3D	Trojměrný prostor
4D	Čtyřměrný prostor
5D	Pětměrný prostor
ADI	Austempered Ductile Iron
AI	Umělá inteligence
Al	Chemická značka hliníku
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý
AlTiN	Titanový nitrid hliníku
ALD	Atomic Layer Deposition
AR	Rozšířená realita
C	Chemická značka uhlíku
CACVD	Cascade Arc Chemical Vapour Deposition
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Machining
CATIA	Computer-Aided Three-dimensional Interactive Application
CBN	Kubický nitrid boru
CFD	Computer Fluid Dynamics
CFK	Plasty zesílené uhlíkovými vlákny
CNC	Číslicově řízený stroj
Cr	Chemická značka chromu
CrN	Nitrid chromu

CVD	Chemical Vapour Deposition
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DXF	Drawing Exchange Format
FEA	Finite Element Analysis
FEM	Finite Element Method
GFK	Plasty zesílené skelnými vlákny
HFC	High Feed Cutting
HFCVD	Hot Filament Chemical Vapour Deposition
HSS	High Speed Steel
HT-CVD	High Temperature – Chemical Vapour Deposition
IT	Stupeň přesnosti
ISO	International Organization for Standardization
LICVD (LCVD)	Laser Induced Chemical Vapour Deposition
MKP	Metoda konečných prvků
mm	Milimetr
MMC	Metal Matrix Composites
Mo	Chemická značka molybdenu
MOCVD	Metal-Organic Chemical Vapour Deposition
MT-CVD	Middle Temperature – Chemical Vapour Deposition
MWCVD	MicroWave Plasma Chemical Vapour Deposition
NC	Numerical control
PA	Polyamid
PACVD	Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition
PEEK	Polyetheretherketon

PKD	Polykrystalický diamant
PKNB	Polykrystalický kubický nitrid bóru
PMMA	Polymethylmethakrylát
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVD	Physical Vapor Deposition
Ra	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
R _e	Mez kluzu ve smyku
R _m	Mez pevnosti v tahu
R _{ms}	Mez pevnosti ve smyku
RO	Rychlořezná ocel
Si	Chemická značka křemíku
SiO _x /TiXCo	Nitrid titanu a křemíku
SK	Slinuté karbidy
TiAlN	Povlak nitridu titanu a hliníku
TiB ₂	Borid titaničitý
TiC	Karbid titanu
TiCN	Karbonitrid titanu
TiN	Nitrid titanu
UV	Ultrafialové
V	Chemická značka vanadu
VBD	Vyměnitelné břitové destičky
W	Chemická značka wolframu
WC	Karbid wolframu
ZrN	Nitrid zirkonia
β	Úhel břitu
μm	Mikrometr

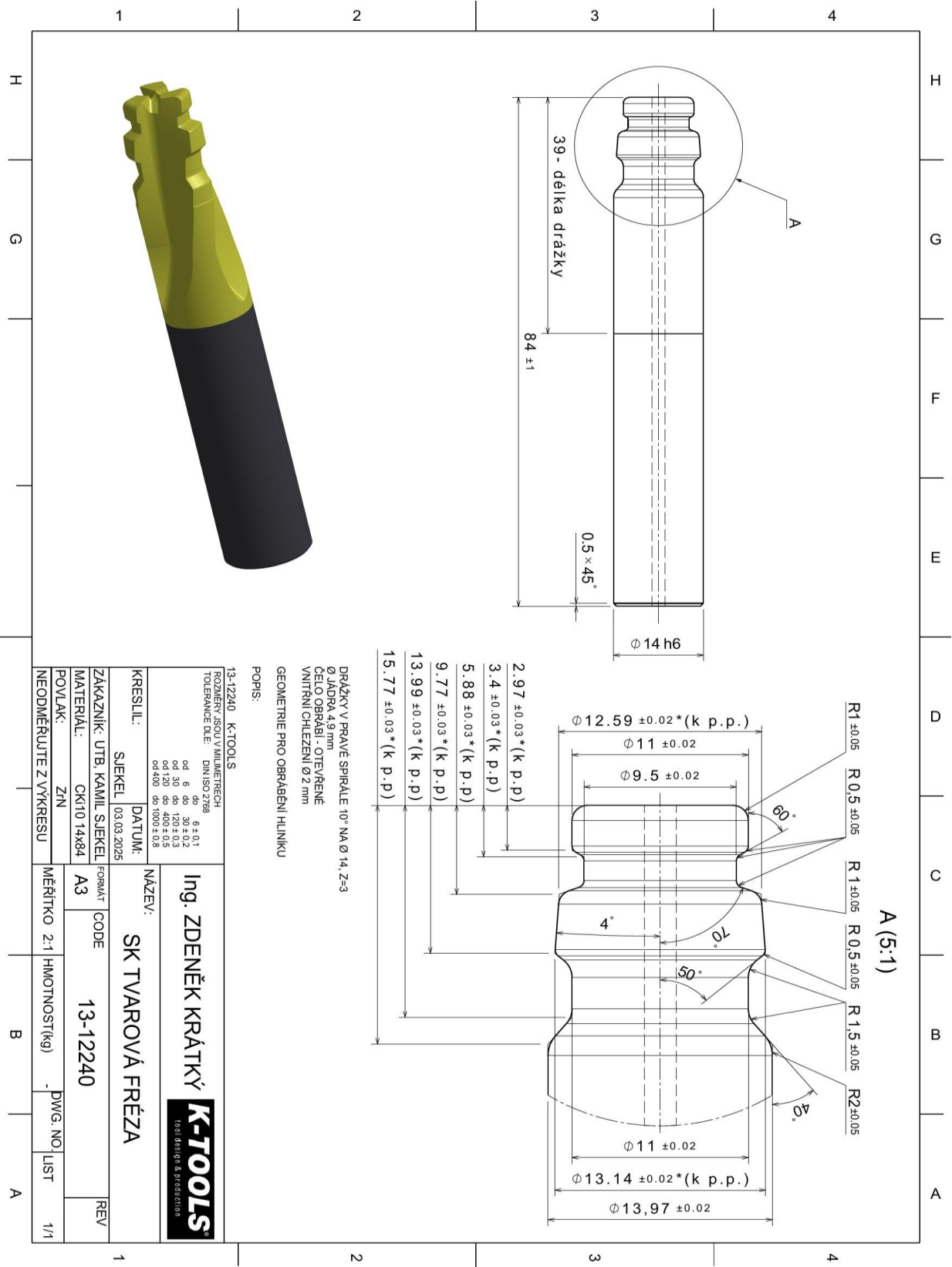
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Výrobní výkres

Příloha P II: Technologický postup

Příloha P III: Kontrolní protokol

PŘÍLOHA P I: VÝROBNÍ VÝKRES



PŘÍLOHA P II: TECHNOLOGICKÝ POSTUP

Průvodka na výrobní příkaz 1-38798			
Zadaná dávka: 2 ks		Vyráběný dílec: 300 13-12240-01	
Najížděcí kus:		SK fréza tvarová pr. 11/9,5/13,14//14, z=3,	
Termín zadání do výroby: 03.03.2025		drážka 10°, MG10 14x84, P+ZrN+P	
Termín ukončení výroby: 14.03.2025		Pozn.:	

Reg. číslo	Název	Množství
220 110.1420330.20	14,0 h5 x 330 mm, CK10, ground, dia. 2,0	0,66 ks

Doklad Typ - Operace	Název	Středisko Pracoviště / Koop	Přípravný čas Jednicový čas	Zhotovil	Stroj	Odvedeno	Zmetky	Datum
1	PŘÍPRAVA	003	0,00 min.					
R- 10	VÝKRESU	9 Pracoviště TPV	0,00 min.					

Přípravi výkres nástroje v rozsahu:
 - návrh tvaru a koncepce nástroje dle podkladů (od zadavatele)
 - předběžné odsouhlasení tvaru a koncepce (od zadavatele)
 - finální odsouhlasení tvaru a koncepce v programu Numroto



A537075B

2	PŘÍPRAVA	003	0,00 min.					
R- 20	PROGRAMU	9 Pracoviště TPV	0,00 min.					

Přípraví program v rozsahu:
 - nastavení nebo kontrola rozměrů, geometrie
 - nastavení nebo kontrola obráběcích nástrojů a jejich řezných podmínek
 - kontrola výrobku a kolizí v 3D simulaci



A537076B

3	DĚLENÍ PR.14	003	5,00 min.					
J- 25		5 Dělička UFT 400	2,00 min.					

Dělí materiál pr.14 na délku 84 +/- 1mm



A537077B

4	SRAŽENÍ PR. 14	003	5,00 min.					
J- 30		1 SAACKE	2,00 min.					

Srazí hranu na rozměr 1x45°, program: "Srazeni14" (V)



A537078B

5	HRUBOVÁNÍ	003	15,00 min.					
J- 35	TVARU-NAJÍŽDĚNÍ	1 SAACKE	0,00 min.					

Hrubuje tvar
 Program: "13-12240_Hrub"(V)



A537079B

6	HRUBOVÁNÍ TVARU	003	0,00 min.					
J- 40		1 SAACKE	3,00 min.					

Hrubuje tvar
 Program: "13-12240_Hrub"(V)



A537080B

7	DRÁŽKA-NAJÍŽDĚNÍ	003	10,00 min.					
J- 45		1 SAACKE	0,00 min.					

Průvodka na výrobní příkaz				1-38798					
Zadaná dávka:		2 ks		Vyráběný dílec: 300 13-12240-01					
Najížděcí kus:				SK fréza tvarová pr. 11/9,5/13,14//14, z=3,					
Termín zadání do výroby:		03.03.2025		drážka 10°, MG10 14x84, P+ZrN+P					
Termín ukončení výroby:		14.03.2025		Pozn.:					
Doklad	Název	Středisko	/ Koop	Přípravný čas	Zhotovil	Stroj	Odvedeno	Zmetky	Datum
Typ - Operace		Pracoviště		Jednicový čas					

Brousí drážku
Program: "13-12240"(TF)



A537081B

8 J- 50	DRÁŽKA	003	0,00 min.					
		1 SAACKE	8,00 min.					
Brousí drážku								
Program: "13-12240"(TF)								



A537082B

9 J- 55	ČELO+TVAR-NAJÍŽ	003	90,00 min.					
	DĚNÍ	1 SAACKE	0,00 min.					
Brousí čelo a tvar								
Program: "13-12240"(TF)								



A537083B

10 J- 60	ČELO+TVAR	003	0,00 min.					
		1 SAACKE	55,00 min.					
Brousí čelo a tvar								
Program: "13-12240"(TF)								



A537084B

11 R- 80	POPIS NÁSTROJE	003	0,00 min.					
	LASEREM	7 LM 110 - Laser	0,34 min.					
Značí laserem:								
13-12240-01 K-TOOLS								



A537085B

12 R- 90	VIZUÁLNÍ	003	0,00 min.					
	KONTROLA+OČIŠTĚNÍ NÁSTROJE	8 Pracoviště balení	0,00 min.					
VIZUÁLNÍ KONTROLA+OČIŠTĚNÍ NÁSTROJE								
Provede ten, kdo dělal poslední opeaci - zodpovídá za celkovou podobu všech kusů								
(zkontroluje zda byly správně provedeny všechny položky na tech.postupu a zda jsou všechny kusy řádně očištěny od popisků od výrobců materiálu a od zabarvení fixou)								



A537086B

13 R- 100	OMÍLÁNÍ OTEC	003	0,00 min.					
	H4/500 + H4/600 pr. 14,0	15 Omílání ROBOT	0,00 min.					
OMÍLÁNÍ pr. 14,0								
Požadovaná hodnota Rmax= 4 µm								
Skutečná hodnota:								
T= 30 s								



A537087B

Průvodka na výrobní příkaz 1-38798									
Zadaná dávka: 2 ks Najížděcí kus: Termín zadání do výroby: 03.03.2025 Termín ukončení výroby: 14.03.2025			Vyráběný dílec: 300 13-12240-01 Pozn.: SK fréza tvarová pr. 11/9,5/13,14//14, z=3, drážka 10°, MG10 14x84, P+ZrN+P						
Doklad Typ - Operace	Název	Středisko Pracoviště / Koop	Přípravný čas Jednicový čas	Zhotovil	Stroj	Odvedeno	Zmetky	Datum	
14 K- 110	POVLAK ZrN pr.14,0 POVLAK ZrN pr.14,0	100014 POVLAK ZrN I SHM, s.r.o.	0,00 min. 0,00 min.						
							 A537088B		
15 R- 120	OMÍLÁNÍ OTEC H4/500 +H4/600 pr. 14,0 OMÍLÁNÍ pr. 14,0 Požadovaná hodnota Rmax= 5 µm Skutečná hodnota: T= 30 S	003 15 Omílání ROBOT	0,00 min. 0,00 min.						
							 A537089B		
16 R- 130	BALENÍ A ŠTÍTKOVÁNÍ Nástroje vloží do obalu a nalepí štítky	003 8 Pracoviště balení	0,00 min. 0,00 min.						
							 A537090B		

PŘÍLOHA P III: KONTROLNÍ PROTOKOL

Kontrolní protokol

»genius Standard« - GEN3-00091

Uživatel

1 / 1

11.3.2025

11:01:27



Ident-č. 13-12240

Ozn.

Komentář

Zkušební technik



Výsledek	Požad.hodn.	Skut.hodn.	H. tol.	S. tol.	Rozd.hodn.	Tolerance
Rádus	1,000	1,023	0,05	-0,05	0,023	
Délka	2,970	2,966	0,03	-0,03	0,004	
Rádus	0,500	0,533	0,05	-0,05	0,033	
Délka	3,400	3,401	0,03	-0,03	-0,001	
Úhel	60,00	60,02			0,2	
Rádus	0,500	0,455	0,05	-0,05	-0,045	
Délka	5,860	5,853	0,03	-0,03	0,007	
Rádus	1,000	0,987	0,05	-0,05	-0,013	
Úhel	70,00	69,94			-0,06	
Délka	9,760	9,76	0,03	-0,03	0	
Úhel	4,00	3,98			-0,02	
Rádus	0,500	0,544	0,05	-0,05	0,044	
Délka	13,990	13,984	0,03	-0,03	0,006	
Úhel	50,00	50,04			0,04	
Rádus	1,500	1,502	0,05	-0,05	0,002	
Rádus	1,500	1,462	0,05	-0,05	-0,038	
Délka	15,770	15,747	0,03	-0,03	0,023	
Úhel	40,00	40,09			0,09	
Průměr	11,000	10,988	0,02	-0,02	-0,012	
Průměr	9,500	9,496	0,02	-0,02	-0,004	
Průměr	12,590	12,582	0,02	-0,02	-0,008	
Průměr	13,140	13,132	0,02	-0,02	-0,008	
Průměr	11,000	10,988	0,02	-0,02	-0,012	
Průměr	13,970	13,956	0,02	-0,02	-0,014	
Rádus	2,000	1,977	0,05	-0,05	-0,023	
Úhel čela MT 0,300	9,50	8,95	1,5	-1,5	-0,55	
Úhel hřbetu 1 (obvod)	8,00	7,87	1	-1	-0,13	
Úhel čela MT 0,300	20,00	18,64	1,5	-1,5	-1,36	
Průměr jádra	4,900	4,911	0,1	-0,1	0,011	

Všechny jednotky délky jsou v milimetrech, všechny jednotky úhlu jsou ve stupních

Ing. Zdeněk Krátký, Tř. T. Bati 5334, areál Svit (71. budova), 760 01 Zlín, CZECH REPUBLIC
Tel., Fax: +420 577 523 370, Mobil: +420 727 852 815, Email: info@k-tools.cz, www.k-tools.cz