

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T004 Strojírenská technologie - technologie
obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh frézovacího nástroje pro řeznou keramiku

Autor: **Bc. Tomáš Krčma**

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Jiří Česánek, Ph. D.**

Akademický rok 2014/2015

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš KRČMA**
Osobní číslo: **S13N0068P**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie - technologie obrábění**
Název tématu: **Návrh frézovacího nástroje pro řeznou keramiku**
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :


1. Analýza současného stavu řešené problematiky
2. Návrh frézovacího nástroje ve variantách
3. Výběr nejvhodnější varianty a její zpracování
4. Technické zhodnocení navržené varianty
5. Závěr

Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: 50 - 70 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná
Seznam odborné literatury:

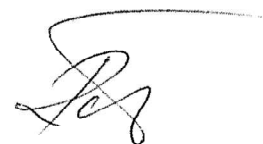
- CHLADIL, J. Přípravky a nástroje : část-obrábění. 3. vyd. Brno : VUT, 1992. ISBN 80-214-0408-6
- ŘASA, J., GABRIEL, V. Strojírenská technologie 3 - 1. díl - Metody, stroje a nástroje pro obrábění. 1. vyd. Praha, Scientia, spol. s r.o., 2000. 256 s. ISBN 80-7183-207-3.
- ŠVEC, S. Řezné nástroje: 3. přeprac. vyd, Praha, ČVUT, 1974.
- KVASNIČKA, I., SLAVÍK, V., ŠTAJNOCHR L. Obráběcí nástroje. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 1998. ISBN 80-01-01755-9.
- Katalogy nástrojů firem ISCAR, SANDVIK, COROMANT, PRAMET Šumperk a dalších

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Jiří Česánek, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění
Konzultant diplomové práce: **Doc. Ing. Jiří Česánek, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Datum zadání diplomové práce: **20. října 2014**
Termín odevzdání diplomové práce: **22. května 2015**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 20. října 2014

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Autorská práva

Podle Zákona o právu autorském č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledku diplomové práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Krčma	Jméno Tomáš		
STUDIJNÍ OBOR	2303T004 „Strojírenská technologie - technologie obrábění“			
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Česánek, Ph. D.	Jméno Jiří		
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KTO			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Návrh frézovacího nástroje pro řeznou keramiku			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2015
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	64	TEXTOVÁ ČÁST	39	GRAFICKÁ ČÁST	25
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Tato diplomová práce se zabývá návrhem frézovacího nástroje pro zadanou vyměnitelnou břitovou destičku z řezné keramiky. Součástí práce je komplexní návrh nástroje společně se souhrnem informací o dané problematice.
KLÍČOVÁ SLOVA	Frézování, frézovací nástroj, řezná keramika, negativní geometrie, vyměnitelná břitová destička,

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Tomáš	Name Krčma	
FIELD OF STUDY	2303T004 „Manufacturing Processes - Technology of Metal Cutting“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Česánek, Ph. D.	Name Jiří	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Design of milling tool for cutting ceramics		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KTO	SUBMITTED IN	2015
----------------	---------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	64	TEXT PART	39	GRAPHICAL PART	25
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This diploma thesis describes the design of the milling tool with the specified cutting insert made of cutting ceramics. The work includes a comprehensive tool design and a summary of information about this issue.
KEY WORDS	Milling , milling tool, cutting ceramics, negative geometry, cutting inserts,

Poděkování

Rád bych poděkoval všem pedagogickým pracovníkům Západočeské univerzity, kteří mě během studia vedli a předávali mi své znalosti a zkušenosti. Poděkování patří především vedoucímu diplomové práce **Doc. Ing. Jiřímu Česánkovi, Ph. D.** za vedení práce a za důležité připomínky. Dále bych chtěl poděkovat rodině a všem svým blízkým za podporu během studia.

Tomáš Krčma

Obsah

Obsah.....	7
Přehled použitých označení a jednotek	9
Seznam použitých zkratk.....	10
Úvod.....	11
1 Analýza současného stavu řešené problematiky	12
1.1 Frézování	12
1.2 Kulová fréza	12
1.3 Vyměnitelné břitové destičky	13
1.3.1 Značení	13
1.3.2 Geometrie	14
1.3.2.1 Pozitivní a zvláště pozitivní geometrie	14
1.3.2.2 Negativní geometrie	15
1.3.3 Typ provedení VBD	16
1.3.4 Tvar	16
1.3.5 Tloušťka VBD	17
1.3.6 Velikost VBD	17
1.4 Řezné materiály	17
1.4.1 Řezná keramika	19
1.4.1.1 Čistá oxidická řezná keramika	20
1.4.1.2 Polosměsná oxidická keramika	20
1.4.1.3 Směsná oxidická keramika	20
1.4.1.4 Neoxidická řezná keramika	20
1.4.1.5 Vyztužení řezné keramiky	21
1.4.1.6 Rozsah využití řezné keramiky	22
1.4.1.7 Výhody řezné keramiky	23
1.4.1.8 Nevýhody řezné keramiky	23
1.4.1.9 Vybrané firmy nabízející řeznou keramiku	23
1.5 Upínání destiček	24
1.6 Lůžko nástroje pro uložení VBD	26
1.7 Tělo nástroje [9].....	27
1.7.1 Namáhání těla nástroje	27
1.7.2 Stopka nástroje	28
1.7.3 Materiál těla nástroje	29
1.8 Základní typy upínání nástrojů se stopkou	29
1.8.1 Upínání pomocí kleštín	29
1.8.2 Upínání pomocí hydraulického upínače	29
1.8.3 Upínání pomocí tepelných upínačů	30
1.9 Současný stav moderních kulových fréz nabízených na trhu	30
2 Návrh frézovacího nástroje ve variantách	32
2.1 Problematika řešení	33
2.2 Návrh variant řešení.....	33
2.2.1 Geometrie břitu	33
2.2.2 Úprava VBD.....	34
2.2.3 Úpravy lůžka nástroje.....	35
2.2.3.1 Úprava pro správné dosednutí VBD	35
2.2.3.2 Úprava pro navedení VBD do lůžka	35
2.2.4 Varianta řešení 1.....	36

2.2.4.1	Návrh upínky pro variantu č. 1	36
2.2.4.2	Lůžko nástroje, upnutí upínky pro variantu č. 1	36
2.2.4.3	Tělo nástroje, sestava nástroje pro variantu č. 1	37
2.2.5	Varianta řešení 2.....	38
2.2.5.1	Návrh upínky pro variantu č. 2	38
2.2.5.2	Lůžko nástroje, upnutí upínky pro variantu č. 2	38
2.2.5.3	Tělo nástroje, sestava nástroje pro variantu č. 2	39
2.2.6	Varianta řešení 3.....	40
2.2.6.1	Návrh upínání pro variantu č. 3	40
2.2.6.2	Lůžková část nástroje pro variantu řešení č. 3	40
2.2.6.3	Tělo nástroje, sestava nástroje pro variantu č. 3	41
3	Výběr nejvhodnější varianty	42
4	Zpracování nejvýhodnější varianty	43
4.1	Experiment: měření řezných sil na kulové fréze pomocí dynamometru	43
4.2	Návrh materiálů částí nástroje	45
4.2.1	Návrh šroubu upínky	45
4.2.2	Určení materiálu šroubu	47
4.2.3	Materiál 15 230	47
4.2.4	Návrh materiálů upínky.....	48
4.2.5	Určení materiálu upínky.....	48
4.2.6	Materiál 16343	49
4.2.7	Materiál těla nástroje.....	49
4.2.8	Použité materiály.....	49
4.2.9	Omezující parametr návrhu.....	50
4.2.10	Doplňující informace návrhu	51
4.3	Analýza návrhu metodou konečných prvků MKP	52
4.3.1	Předběžný výpočet	52
4.3.2	Výpočtový model	54
4.3.3	První analýza	55
4.3.4	Druhá analýza.....	57
5	Technické zhodnocení navržené varianty	58
5.1	Technické hodnocení návrhu z jednotlivých hledisek.....	58
6	Závěr.....	60
	Použitá literatura	61
	Seznam obrázků	63
	Seznam tabulek	64
	Seznam příloh.....	64

Přehled použitých označení a jednotek

OZNAČENÍ	JEDNOTKY	NÁZEV VELIČINY
F_{ξ}	[N]	síla ve šroubu
$F_{\xi x}$	[N]	složka síla F_{ξ}
$F_{\xi z}$	[N]	složka síla F_{ξ}
F_u	[N]	upínací síla držící upínku
F_{ux}	[N]	složka upínací síly držící upínku
F_{uz}	[N]	složka upínací síly držící upínku
F_r	[N]	reakční síla v místě zámku upínky
F_{rx}	[N]	složka reakční síly v místě zámku upínky
F_{rz}	[N]	složka reakční síly v místě zámku upínky
a'	[mm]	rameno působení síly ve šroubu
b'	[mm]	rameno působení síly ve šroubu
a	[mm]	rameno působení složky síly ve šroubu
b	[mm]	rameno působení složky síly ve šroubu
M_o	[N·mm]	ohybový moment
F_f	[N]	síla působící proti posuvu f
L_o	[mm]	vyložení nástroje
σ_o	[MPa]	napětí v ohybu
W_o	[mm ³]	modul průřezu v ohybu
σ_{Do}	[MPa]	dovolené napětí v ohybu
M_k	[N·mm]	kroutící moment
F_k	[N]	hlavní složka řezné síly namáhající tělo nástroje na krut
L_k	[mm]	vzdálenost působení síly F_k od středu nástroje
σ_K	[MPa]	napětí v krutu
W_k	[mm ³]	modul průřezu v krutu
σ_{DK}	[MPa]	dovolené napětí v krutu
σ_{DOV}	[MPa]	dovolené napětí v tahu šroubu
d_3	[mm]	průměr jádra závitu
σ_{ODOV}	[MPa]	dovolené napětí v ohybu upínky
α_o	[°]	úhel hřbetu v ortogonální rovině
β_o	[°]	úhel břitu v ortogonální rovině
γ_o	[°]	úhel čela v ortogonální rovině
δ_o	[°]	úhel řezu v ortogonální rovině
F_x	[N]	řezná síla v ose x
F_y	[N]	řezná síla v ose y
F_z	[N]	řezná síla v ose z
F_v	[N]	zatěžující síla pro výpočet namáhání nástroje
F_{vx}	[N]	složka zatěžující síly v ose x
F_{vy}	[N]	složka zatěžující síly v ose y
F_{vz}	[N]	složka zatěžující síly v ose z
R_m	[MPa]	mez pevnosti
R_e	[MPa]	mez kluzu
R_{emin}	[MPa]	minimální mez kluzu
v_c	[m/min]	řezná rychlost
a_p	[mm]	hloubka řezu
f	[mm/ot]	posuv
n	[ot/min]	otáčky

v_f	[mm/min]	posuvová rychlost
k	[-]	koeficient bezpečnosti
α	[°]	úhel natočení síly ve šroubu

Seznam použitých zkratk

VBD	Vyměnitelná břitová destička
ČSN	Česká státní norma
ISO	International Organization for Standardization
HV	Tvrдость podle Vickerse
MKP	Metoda konečných prvků
KTO	Katedra Technologie Obrábění

Úvod

V současnosti je v konstrukci součástí kladen největší důraz na miniaturizaci, přesnost a snižování hmotnosti. To vše za žádných okolností nesmí ovlivnit životnost a kvalitu výsledného výrobku. Neustále se zvyšující požadavky na výrobu součástí vedou k vývoji nových obráběcích nástrojů, které umožňují současně výrobní nároky plnit.

Vývoj je zaměřen převážně na výzkumu nových řezných materiálů, které budou mít fyzikální, chemické, mechanické a tepelné vlastnosti splňující současně vysoké požadavky.

Nacházení nových řezných materiálů je úzce spojeno s vývojem samotného těla nástroje. Jedním ze současných trendů dnešní doby je miniaturizace. Miniaturizace a současně zvyšující se požadavky na obráběné materiály vedou ke zvýšení namáhání těl nástrojů.

Význam samotného obrábění stoupá například při výrobě forem, kdy se obrábí již v tepelně upraveném stavu. Dosahuje se tak přesnějších rozměrů a zkrácení výroby formy. V minulosti se formy obráběly před tepelným zpracováním a po tepelném zpracování se rozměry změnily, což vedlo k následným zdlouhavým úpravám a prodloužení výrobního procesu formy.

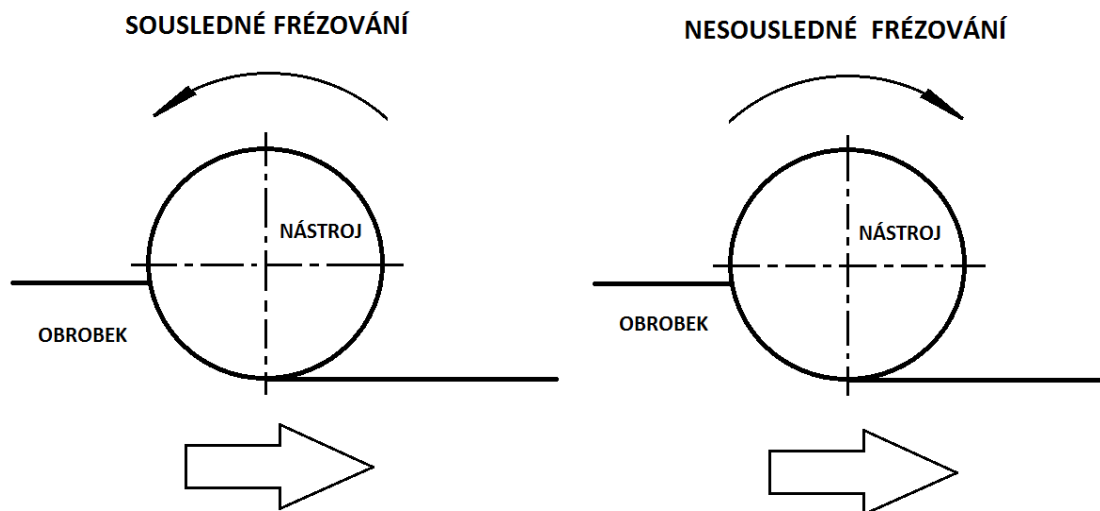
Vývoj nových technologií má za následek zjednodušení výrobních procesů, zlevnění výroby, dosažení lepší kvality povrchů, dosahování přesnějších rozměrů a mnoho jiného.

Předmětem této diplomové práce je konstrukční návrh frézovacího nástroje pro řeznou keramiku. Jedná se o kulovou frézu s vyměnitelnou břitovou kruhovou destičkou s negativní geometrií.

1 Analýza současného stavu řešené problematiky

1.1 Frézování

Je to strojní třískové obrábění pomocí rotačního nástroje frézy, který koná hlavní řezný pohyb (rotační). Vedlejší řezné pohyby (posuv, přísuv) koná obrobek. Stroj pro frézování se nazývá frézka. Frézování se rozděluje na dva základní typy: sousledné a nesousledné. Při sousledném frézování je směr rotace stejný se směrem pohybu obrobku, při nesousledném frézování je směr rotace opačný oproti směru pohybu obrobku. [1]



Obrázek 1: Sousledné a nesousledné frézování

Základní rozdělení fréz [2]:

Dle způsobu upnutí na :

stopkové (s válcovou stopkou, s kuželovou stopkou), nástrčné

Dle obráběcí plochy frézy na:

obvodové, celoplošné, kombinované

Dle tvaru hlavy na:

kulové, válcové, stromové, kuželové, tvarové

Dle způsobu výroby frézy na:

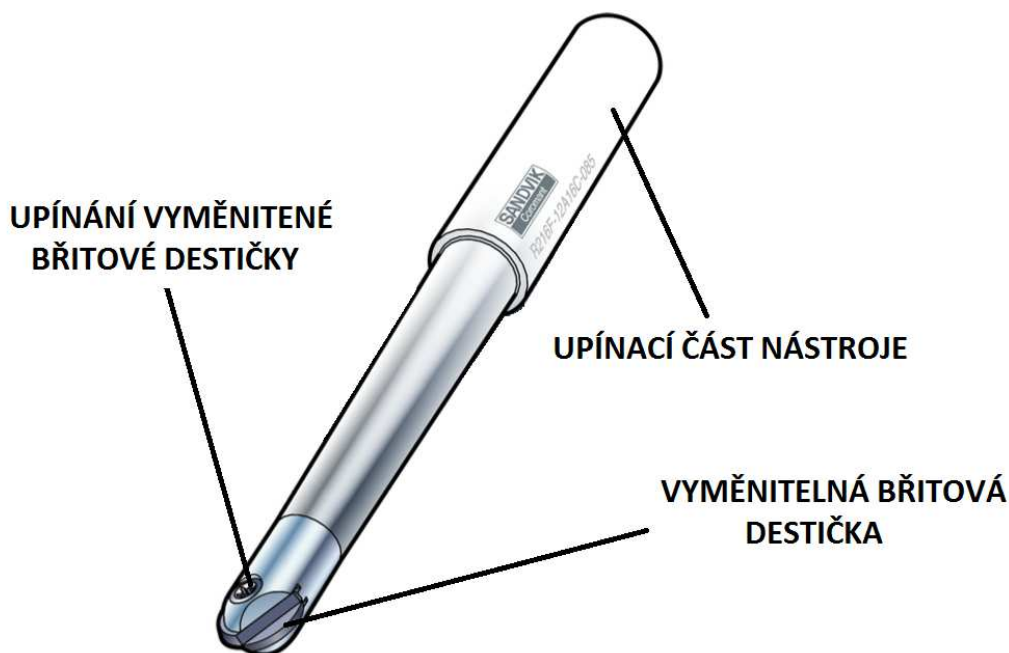
frézování, odléváním, podsoustružováním

Dle koncepce nástroje na:

nástroje celistvé, nástroje s VBD

1.2 Kulová fréza

Jde o rotační obráběcí nástroj používaný ke kopírovacímu frézování. Patří převážně mezi dokončovací nástroje. Používá se ve dvojím provedení. Jednak jako monolitní, jednak s mechanicky upnutou vyměnitelnou břitovou destičkou.



Obrázek 2: Kulová fréza od firmy SANDVIK COROMANT s popisem základních částí nástroje[3]

1.3 Vyměnitelné břitové destičky

Jde o moderní konstrukční prvek obráběcích nástrojů. Vyměnitelné břitové destičky prochází neustále svým vývojem. Pro snadný přehled a zaměnitelnost VBD byly nejpoužívanější typy sjednoceny mezinárodní normou ISO 1832 . Vývoj destiček jde neustále kupředu a norma je neustále doplňována. Vyrábí se ze slinutého karbidu nebo ze řezné keramiky.[4]

1.3.1 Značení

Norma ISO udává značení VBD. Základní kód se skládá ze 7 základních znaků. Kód může obsahovat nejvíce 12 znaků.

Význam jednotlivých čísel	
1 - tvar	7 - poloměr špičky
2 - úhel hřbetu	8 - provedení břitu
3 - tolerance rozměrů	9 - provedení nástroje(směr posuvu)
4 - typ	10 - šířka fazetky
5 - velikost	11 - úhel fazetky
6 - tloušťka	12 - možnost volby výrobce

Tabulka 1: Význam číslování VBD podle ISO

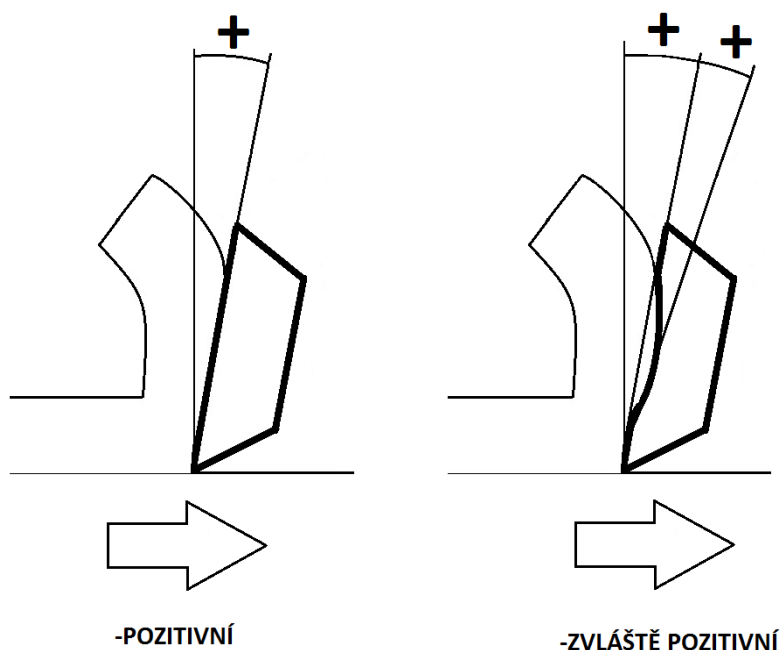
1.3.2 Geometrie

Geometrie břitu VBD je dána uložením destičky v lůžku nástroje. Rozlišujeme tři hlavní typy negativní, pozitivní nebo zvláště pozitivní.

1.3.2.1 Pozitivní a zvláště pozitivní geometrie

U destiček s pozitivní geometrií břitu je destička uložena v nástroji tak, že úhel čela destičky je kladný. Úhel hřbetu je na destičce vyroben. Zvláště pozitivní geometrie je speciální případ pozitivní geometrie, kdy je na destičce vyroben utvářeč, který úhel čela zvětšuje.

Pozitivní geometrie břitu nelze použít pro obrábění vysokopevnostních materiálů, jelikož by hrozilo ulomení špičky břitu vyměnitelné břitové destičky. Tento typ geometrie se vyznačuje svým dobrým odvodem třísek z místa řezu a menším třením na čele břitu VBD.



Obrázek 3: Vyměnitelná břitová destička s pozitivní a zvláště pozitivní geometrií [5]

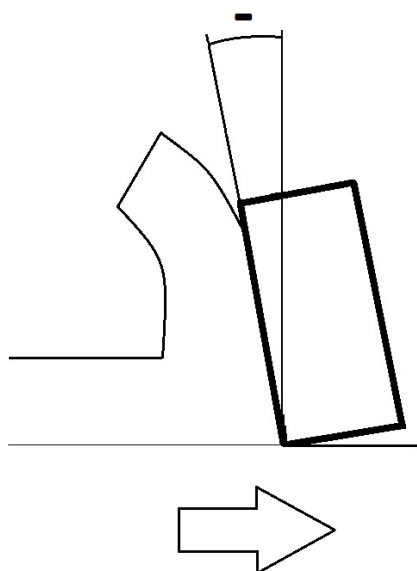
+	-
Dobry odvod třísek	Větší opotřebení břitu
Menší řezné síly	Menší pevnost VBD
Menší vznik tepla	

Tabulka 2: Základní výhody a nevýhody VBD s pozitivní geometrií

1.3.2.2 Negativní geometrie

Destičky s nulový úhlem hřbetu se označují jako negativní. Pro vytvoření samotného úhlu hřbetu je zapotřebí destičku při uložení do těla nástroje vyklonit. V důsledku vyklonění destičky vznikne však záporný úhel čela. Záporný úhel čela negativně ovlivňuje oblast sekundární plastické deformace při obrábění. Negativní břitové destičky jsou použitelné pouze pro nesousledné frézování .[1], [5], [6]

Negativní geometrii je vhodné použít pro obrábění vysokopevnostních materiálů. Nástroje s VBD s negativní geometrií jsou pevnější než nástroje s pozitivní geometrií břitu. Jednou z největších výhod negativní geometrie je její oboustranné použití. Při obrábění tímto typem geometrie břitu dochází k špatnému odvodu třísek z místa řezu a k vyšším silám při obrábění.



Obrázek 4: Vyměnitelná břitová destička s negativní geometrií [5]

+	-
Oboustranné použití VBD	Zvyšuje se tření na čele hřbetu
Pevný nástroj	Špatný odvod třísek
Jednodušší výroba VBD	Vyšší řezné síly

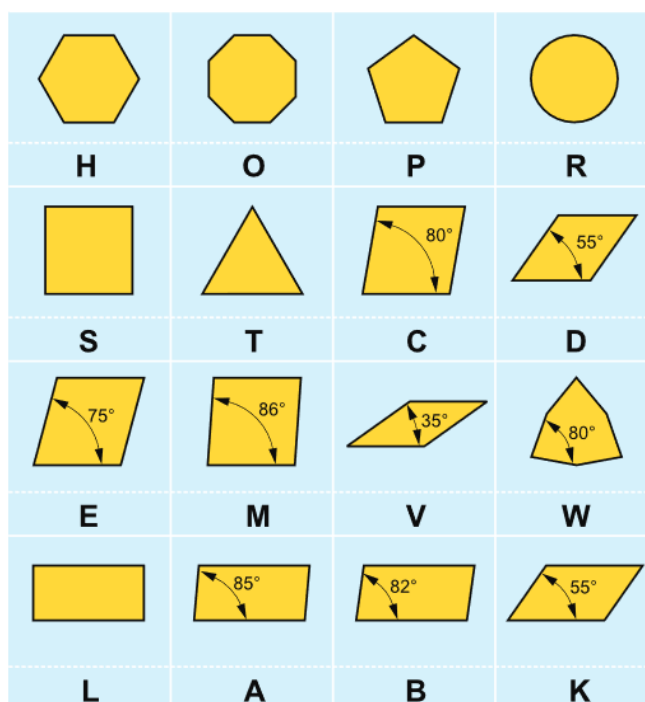
Tabulka 3: Základní výhody a nevýhody VBD s negativní geometrií

1.3.3 Typ provedení VBD

Typ provedení VBD závisí na několika faktorech. Jedním z faktorů je materiál vyměnitelné břitové destičky. U VBD z řezné keramiky není možné použít destičku s centrální dírou pro uchycení, jelikož by toto upnutí vedlo k prasknutí vyměnitelné břitové destičky vlivem upínací síly vedené skrz destičku. Pro řeznou keramiku se volí destičky v celistvém provedení. U vyměnitelných břitových destiček ze slinutých karbidů se používá provedení s centrálním válcovým nebo kuželovým otvorem pro upnutí. [4]

1.3.4 Tvar

Tvar břitových destiček prochází neustálým vývojem. První břitové destičky měly čtvercový a trojúhelníkový tvar. Výhoda čtvercové destičky je v jejím vícenásobném použití. Při pozitivní geometrii břitu ji lze použít čtyřikrát, při negativní až osmkrát. Nevýhoda této destičky je v její omezenosti používání. Nelze ji použít pro nástroje s úhlem nastavení hlavního ostří 90° . Nástroj by pak měl úhel nastavení vedlejšího ostří nulové. Se čtvercovými destičkami tedy nelze obrábět do rohu. VBD s trojúhelníkovým tvarem mají úhel špičky 60° . Použitelnost je 3-6 krát dle typu použité geometrie břitu. Mají menší stabilitu břitu a rychleji se opotřebovávají. Dále se začaly používat destičky s úhlem špičky 80° , které jsou kompromisem mezi čtvercovými a trojúhelníkovými VBD. Pro méně přístupná místa lze použít destičky s úhlem špičky 55° , 35° . S klesající velikostí úhlu klesá stabilita břitu a zvyšuje se opotřebení. V případě použití těchto destiček je nutné přizpůsobit řezné podmínky těmto destičkám. Kruhové destičky mají svoji největší výhodu v několikanásobném použití břitu. Jejich použití je omezené. Nelze s nimi obrábět do rohu. Kruhové destičky se nejčastěji používají jako dokončovací pro kopírovací frézování. Dále existují speciální tvary VBD pro určitý typ obrábění. Jedná se například o destičky pro závitování. [4]



Obrázek 5: Základní tvary destiček dle ISO [7]

1.3.5 Tloušťka VBD

Tloušťku vyměnitelné břitové destičky není možné volit podle jasně určujících kritérií. Tloušťka destiček pro jednotlivé rozměry je dána výrobcem. Obecně platí, že tloušťka vyměnitelných břitových destiček z řezné keramiky je z důvodu menší ohybové pevnosti keramiky větší než destiček ze slinutých karbidů . [4]

1.3.6 Velikost VBD

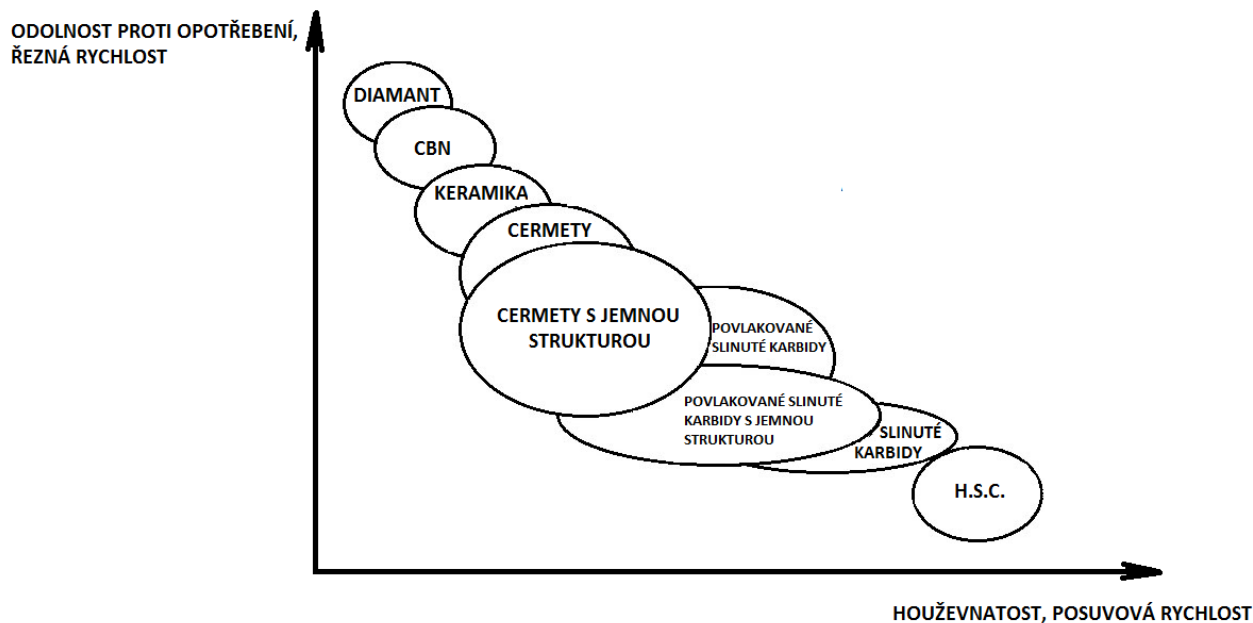
Hlavním faktorem určující velikost vyměnitelné břitové destičky je délka řezné hrany. Velikost destičky se volí podle hloubky záběru a úhlu nastavení tak, aby v záběru byla maximálně přípustná délka ostří destičky. [4]

1.4 Řezné materiály

Vývoj řezných materiálů je přímo spojený s vývojem konstrukčních materiálů, které je zapotřebí obrábět. Řezné nástroje jsou vyráběny jako monolitní, s vyměnitelnou břitovou destičkou nebo s pájenými břity. U monolitních nástrojů je tělo a břit nástroje vyroben z jednoho kusu. U nástrojů s vyměnitelnými břitovými destičkami a pájenými břity je tělo vyrobeno z konstrukční oceli. Pouze VBD a samotné břity jsou vyrobeny z řezné oceli. Materiál břitu v oblasti ostří musí mít dostatečnou tvrdost a houževnatost i za zvýšených řezných podmínek. Současné používané řezné materiály jsou: nástrojové oceli-rychlořezné, slinuté karbidy, cermety, řezná keramika a supertvrdé materiály (syntetický diamant a kubický nitrid bóru). Všechny tyto řezné materiály procházejí neustálým vývojem, který má za následek možnost zvětšování řezných rychlostí při obrábění. Pro zvýšení životnosti, parametrů nástroje a minimalizaci řezných kapalin při obrábění se některé řezné materiály povlakuji. Použití jednotlivých typů řezných materiálů určují jejich základní vlastnosti. Základní vlastnosti řezných materiálů jsou v tabulce 4. [8]

Základní vlastnosti řezných materiálů	
Fyzikální	Součinitel tření, velikost zrna, měrná hmotnost
Chemické	Stálost, inertnost
Mechanické	Tvrdost, modul pružnosti, pevnost v tlaku a ohybu, lomová houževnatost
Tepelné	Teplota vedení, pracovní teplota, tepelná vodivost, délková roztažnost

Tabulka 4: Základní vlastnosti řezných materiálů [8]



Obrázek 6: Diagram srovnání jednotlivých řezných materiálů [9]

Řezný materiál	Tvrдость [HV]	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v ohybu [MPa]
Rychlořezná ocel	750-800	2500-3500	2000-3000
Slinuté karbidy	1300-2000	4000-5600	900-2200
Cermety	2500	4500	900
Řezná keramika	2000-2800	3500-4500	450-1000
Kubický nitrid boru	4500	4000	600
Diamant	7000	3000	300

Tabulka 5: Srovnání vybraných vlastností řezných materiálů[9]

Rychlořezné oceli

Jsou to slitiny železa s uhlíkem. Jsou obohaceny prvky, které zlepšují řezné vlastnosti oceli. Významný je podíl tvrdé karbidické fáze, který tvoří 15-30 % oceli. Mezi hlavní přísadové prvky u rychlořezných ocelí patří wolfram (zlepšující řezivost nástroje), chrom (zlepšující kalitelnost nástroje). Hlavní výhodou rychlořezných ocelí je možnost jejich tepelného zpracování, které mění strukturu materiálu a mění jeho mechanické vlastnosti. [10]

Slinuté karbidy

Jsou jedním z nejpoužívanějších řezných materiálů současnosti. Vyrábí se slinováním. Jejich struktura je tvořena převážně karbidy wolframu (WC), titanu (TiC) a tantalu (TaC), které jsou spojeny kobaltem. Slinuté karbidy se rozdělují dle normy ČSN ISO 513 na 7 skupin [8], [13]:

P - obrábění uhlíkových a litinových ocelí

M - obrábění feritických, chromových, chromniklových a austenitických ocelí, tvárné litiny

K - obrábění šedých litin legovaných i nelegovaných, tvárné litiny, temperované litiny

N - obrábění neželezných slitin na bázi niklu, hliníku, hořčíku a mědi

S - obrábění žárupevných a žáruvzdorných materiálů na bázi niklu, titanu a kobaltu

H - obrábění zušlechťených a kalených o ocelí, tvrzené kokilové litiny

O - plasty

Cermety

Jsou to řezné materiály, jejichž struktura je tvořena tvrdými částicemi (TiC, TiCN, TiN, TaN) spojenými pojivem (Co, Mo, Ni). Mají nižších rozsah řezných podmínek než slinuté karbidy. Cermety se vyznačují kvalitním povrchem po obrábění. Používají se často pro dokončovací operace. [8], [13]

Kubický nitrid boru

Je to jeden z nejtvrdějších materiálů používaný na obrábění. Jeho hlavními znaky je vysoká tvrdost a odolnost při vysokých teplotách. Není vhodný po obrábění příliš měkkých materiálů, jelikož se tak břit kubického nitridu boru velmi rychle opotřebovává. [8], [13]

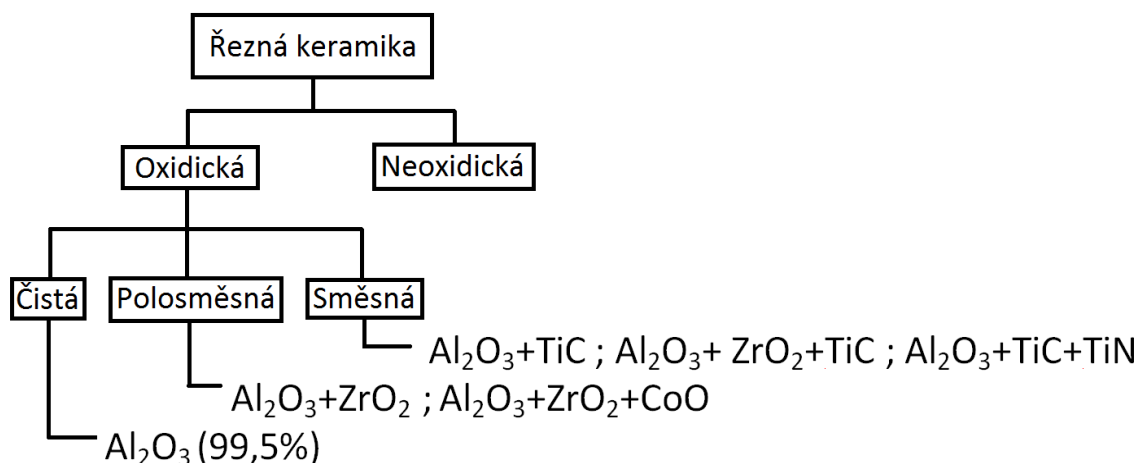
Diamant

Diamant je dosud nejtvrdějším řezným materiálem, který odolává vysokému abrazivnímu opotřebením. Pro svou afinitu k železu není diamant vhodný pro obrábění ocelí a litin. Používá se pro obrábění neželezných kovů a nekovových materiálů, kde se vyžaduje vysoká přesnost rozměrů a kvalita povrchu. [8], [13]

Předmětem této práce je návrh obráběcího nástroje pro řeznou keramiku. Z tohoto důvodu bude dále podrobněji popsán jen tento řezný materiál.

1.4.1 Řezná keramika

Řadí se mezi anorganické nekovové materiály, převážně krystalického charakteru. Její využití v obrábění v porovnání s ostatními materiály je kolem 5% . V současnosti se VBD z řezné keramiky nejrozsáhleji používají u soustružnických nožů, ve frézování u kulových fréz jsou destičky speciálních tvarů a u válcových fréz destičky plné s negativní geometrií. Při obrábění řeznou keramikou nepoužíváme zpravidla řeznou kapalinu. Při frézování řeznou keramikou nedosahujeme tak vysokých teplot jako u soustružení, jelikož při frézování dochází k přerušovaným řezům. Vyrábí se pomocí slinování. Řezná keramika se rozlišuje podle chemického složení na oxidickou a neoxidickou. [6], [9]



Obrázek 7: Rozdělení řezné keramiky[9]

1.4.1.1 Čistá oxidická řezná keramika

Je tvořena z velké části oxidem hlinitým Al_2O_3 (až 99%). Jde o keramiku s dobrou tvrdostí, chemickou odolností a stabilitou ve vysokých teplotách. Má nízkou odolnost proti mechanickému zatěžování, používá se pro jemné dokončovací operace. Čistá keramika může obrábět až při teplotách 1200 °C. [8], [9]

1.4.1.2 Polosměšná oxidická keramika

Základem polosměšné keramiky je čistá keramika, která je obohacena o oxid zirkonu (15-20%). Tímto obohacením se zlepšuje řezivost, pevnost a houževnatost. [9], [13]

1.4.1.3 Směšná oxidická keramika

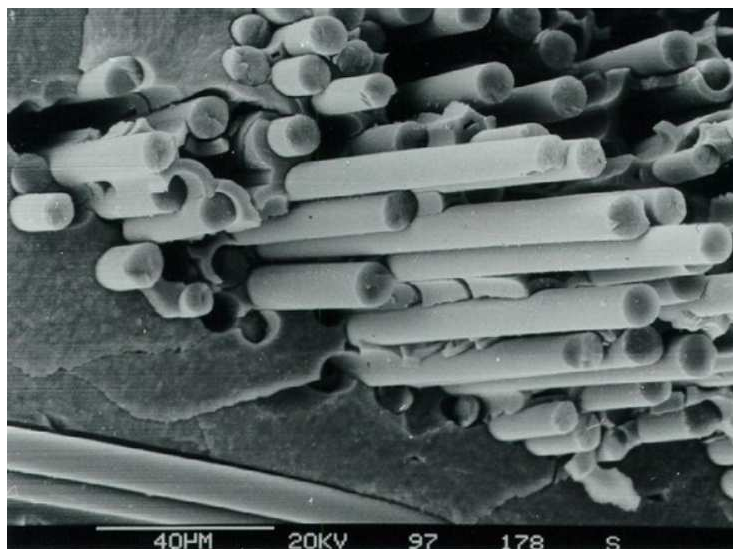
Směšná keramika je založena na oxidu hlinitém obohaceném až 40% karbidem titanu. Existuje mnoho typů směšné keramiky v závislosti na přítomnosti kovové fáze. Směšná keramika je oproti čisté keramice lépe odolná tepelným šokům a má lepší pevnostní vlastnosti. [9], [13]

1.4.1.4 Neoxidická řezná keramika

Základem tohoto druhu řezné keramiky je nitrid křemíku, který se vyskytuje ve dvou modifikacích krystalických struktur α a β . Fáze β má výhodu, že je stabilní i při vysokých teplotách. Neoxidická keramika se vyznačuje oproti oxidické keramice vyšší houževnatostí, pevností v ohybu, odolností proti cyklickému a tepelnému namáhání. Odolnost proti opotřebením a chemická stabilita dosahuje nižších hodnot, než u oxidické keramiky. [9], [13]

1.4.1.5 Vyztužení řezné keramiky

Všechny druhy řezné keramiky se nechají vyztužit krystalickými vlákny křemíku tzv. whiskery. Jsou to vlákna nejčastěji o průměru 0,5-1,0 μm a délce 10-20 μm . Průměry a délky vláken mohou dosahovat i vyšších hodnot v závislosti na typu a zpracování řezné keramiky. Whiskery výrazně zpevňují materiál, díky své relativně vysoké pevnosti, která dosahuje až teoretické pevnosti. Vlákna jsou v materiálu rozmístěna rovnoměrně.



Obrázek 8: Průřez kompozitem s matricí a vyztužujícími vlákny z SiC (zvětšení 1000x) [14]

Vlastnosti řezné keramiky

Řezná keramika se jako materiál vyznačuje vysokou tvrdostí, nízkou měrnou hmotností a nízkou houževnatostí. Mechanické vlastnosti řezné keramiky jsou ovlivněny strukturou materiálu, délkovou roztažností a tepelnou vodivostí.

Vlastnosti	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ + ZrO ₂	Al ₂ O ₃ + TiC
Tvrдость [GPa]	17,2	16,5	20,6
Modul pružnosti v tahu [GPa]	400	390	420
Lomová houževnatost [MPa·m ^{1/2}]	4,3	6,5	4,5
Součinitel délkové roztažnosti [10 ⁻⁶ ·K ⁻¹]	8,0	8,5	8,5
Měrná tepelná vodivost [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	10,5	8,0	13,0

Tabulka 6: Vlastnosti vybraných řezných keramik [11]

Na mechanické a lomové vlastnosti řezné keramiky má vliv především:

- krystalová struktura, která je složitější v porovnání s kovy
- charakter chemické vazby
- prostorové uspořádání částic různých tvarů a rozměrů

1.4.1.6 Rozsah využití řezné keramiky

Charakteristické využití základních druhů řezné keramiky:

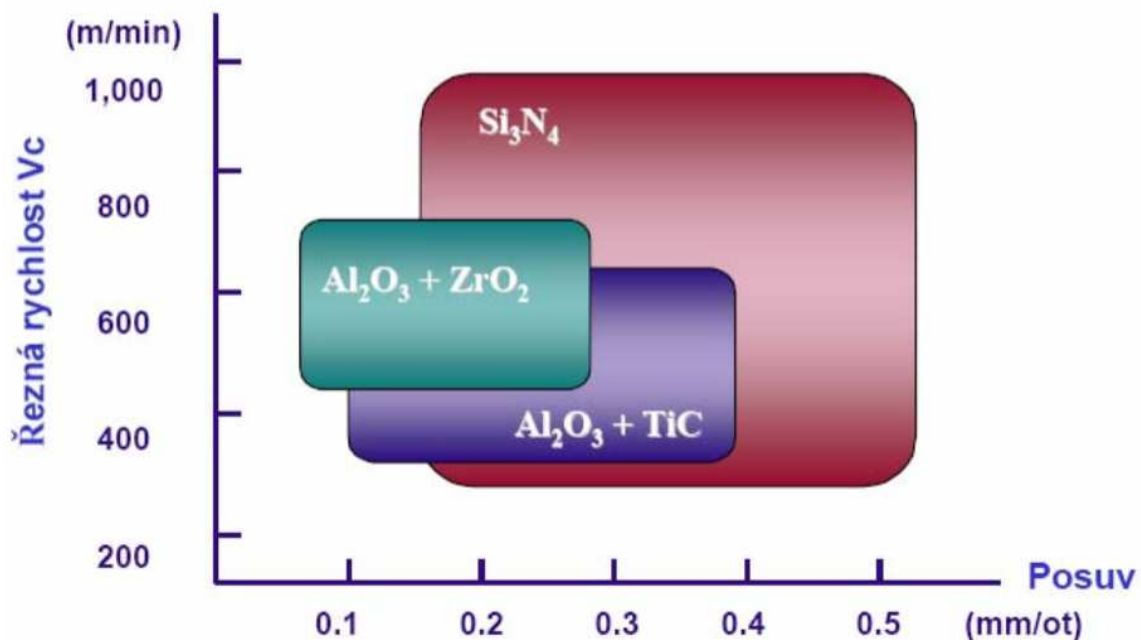
Al₂O₃ - obrábění konstrukčních ocelí vysokými rychlostmi za sucha, litiny. Používá se převážně pro dokončovací operace. [9]

Al₂O₃+ZrO₂ - obrábění tvárné, temperované a šedé litiny, konstrukčních a zušlechtěných ocelí za sucha. Je vhodná pro střední a dokončovací operace, částečně přerušovaný řez. [9]

Al₂O₃+TiC - pro obrábění kalených ocelí a těžko obrobitelných materiálů s částečně přerušovaným řezem. Používá se především pro střední a dokončovací operace. [9]

Al₂O₃+whiskery SiC - obrábění vysokopevnostních žárupevných a žáruvzdorných materiálů, kalené oceli. Vhodné pro hrubovací i dokončovací operace. [9]

Nitridické keramiky na bázi Si₃N₄ - obrábění litiny a slitin na bázi niklu. Použití pro hrubovací i dokončovací operace. [9]



Obrázek 9: Rozsah použití řezné keramiky [9]

1.4.1.7 Výhody řezné keramiky

Při frézování pomocí VBD s řeznou keramikou dochází k nárůstu produktivity obrábění oproti použití karbidových destiček z důvodu dosahovaných vyšších řezných rychlostí. Řezná keramika je dále používána pro svou vysokou tvrdost, odolnost proti mechanickým nárazům, proti opotřebení a vnějším vlivům zejména korozi. Má nízkou měrnou hmotnost. [8]

1.4.1.8 Nevýhody řezné keramiky

Řezná keramika je náchylná na opotřebení ve tvaru vrubu. Jednou z hlavních nevýhod je její křehkost. Nelze ji ostřit.

1.4.1.9 Vybrané firmy nabízející řeznou keramiku

Sandvik Coromant [6]

Firma Sandvik - Coromant se zabývá obráběcími nástroji a s nimi spojenými řeznými materiály. Pro řeznou keramiku nabízí vyměnitelné břitové destičky po soustružení i frézování. K vybraným třídám řezné keramiky patří keramika:

CC620 - jedná se o oxidickou řeznou keramiku pro vysokorychlostní dokončování šedé litiny

CC6050 - smíšená keramika určená pro dokončovací operace tvrzených materiálů

GC1690 - povlakovaná řezná keramika na bázi nitridu křemíku pro hrubovací a dokončovací operace

CC670 - řezná keramika vyztužená whiskery, určená pro zapichování a frézování litin na bázi niklu

Iscar [12]

Firma Iscar se zabývá stejně jako firma Sandvik Coromant obráběcími nástroji s řeznými materiály. K vybraným typům řezné keramiky z patří:

IN 22- řezná keramika na bázi Al_2O_3+TiCN , je určena pro dokončovací operace nástrojových, chromových a kalených ocelí

IS 6 - keramika na bázi SiAlON pro rychlostní obrábění litiny

IW7- whiskerová keramika pro obrábění slitin na bázi niklu. Tato keramika je materiálem zadané VBD pro návrh frézovacího nástroje a je blíže popsána v kapitole 2. Návrh frézovacího nástroje ve variantách.

Saint - Gobain Advanced [11]

Firma pocházející z Francie se zabývá nejen výrobou řezné keramiky. Firma má několik divizí. Z oblasti řezné keramiky produkuje oxidickou keramiku s označením DISAL 100 (jedná se o řeznou keramiku s obsahem až 99% Al_2O_3), směsnou keramiku s označením DISAL 210, 220, 320 (jednotlivé typy keramiky se liší typem obohacení oxidu uhličitého) a nitridovou keramiku s označením 420, 460 (vyznačující se vysokou houževnatostí při zachování vysoké pevnosti).

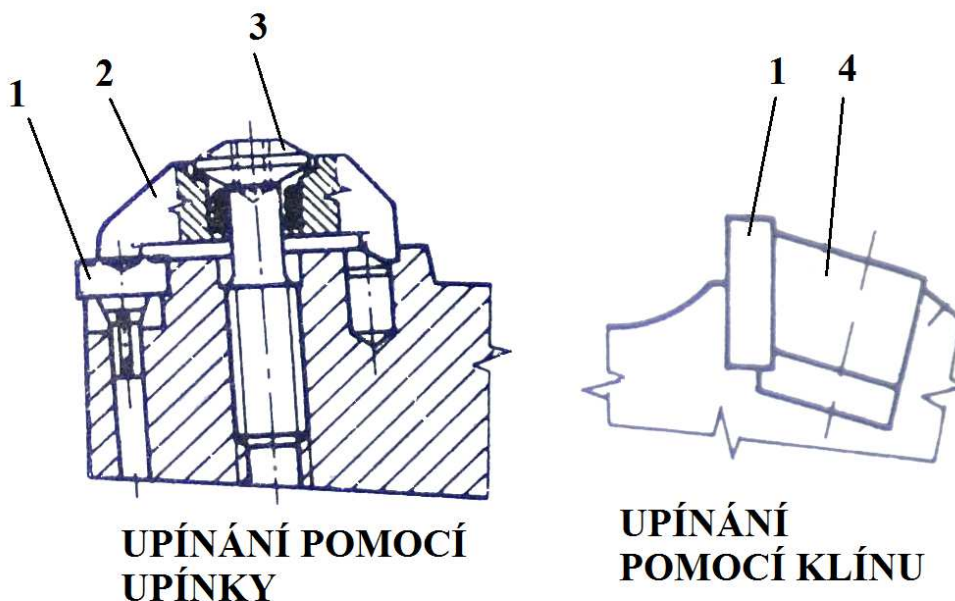
1.5 Upínání destiček

Vyměnitelné břitové destičky z řezné keramiky nelze upínat stejně jako destičky ze slinutého karbidu, které se upínají nejčastěji pomocí centrálního šroubu vedeného skrz samotnou destičku.



Obrázek 10: Upnutí VBD ze slinutého karbidu pomocí centrálního šroubu [3]

Řezná keramika by při tomto řešení upnutí popraskala vlivem pnutí vyvozeného od upínacího šroubu. Pro upínání řezné keramiky se proto nejčastěji volí upínky různého tvaru a působiště upínací síly. Pokud je to konstrukčně možné, lze VBD upínat také pomocí klínů. Upínání pomocí klínu se používá u frézovacích hlav.

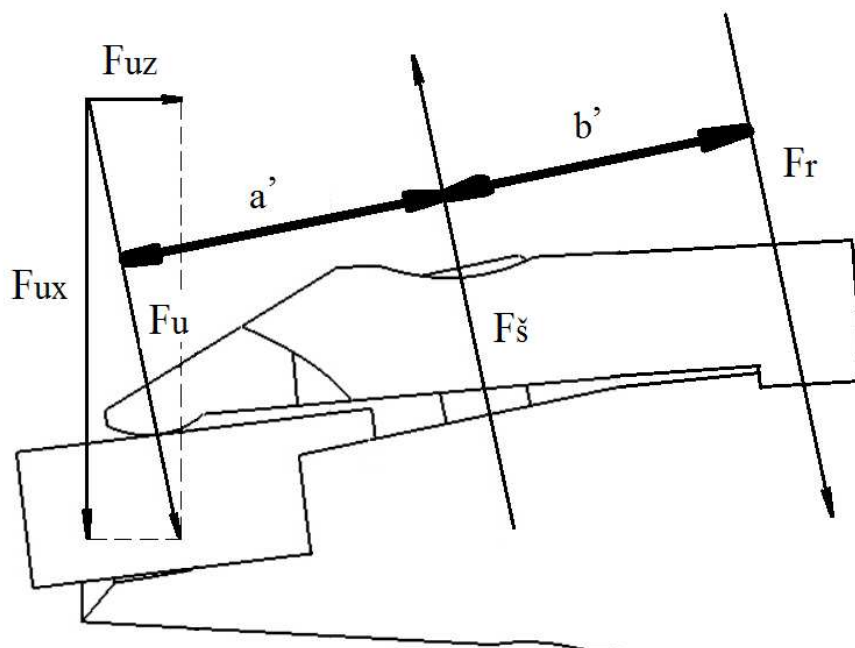


Obrázek 11: Příklad upínání VBD pomocí upínky a klínu [13]

POZN.: 1 - vyměnitelná břitová destička, 2 - upínka, 3 - upínací šroub, 4 - upínací klín

Pro konstrukční návrh kulové frézy bude použita upínka. Z tohoto důvodu bude jen ta dále popsána.

Upínka musí být konstruována tak, aby upínací síla vyvozená od šroubu zatlačovala destičku do nástroje, nebránila nástroji při obrábění a byla dostatečně tuhá. Na obrázku 12 je možné vidět příklad vyvození upínací síly od upínacího šroubu vzhledem k tělu nástroje s vyměnitelnou břitovou destičkou. Síla vyvozená od šroubu F_s působí reakční silou na rameni (a') v místě dotyku destičky silou F_u , síly F_{ux} a F_{uz} drží destičku v lůžku nástroje při řezném procesu.



Obrázek 12: Příklad vyvození upínací síly F

Při návrhu materiálu šroubu a materiálu upínky se vychází ze silových a momentových podmínek. Pro výpočet se uvažuje složka síly, která namáhá šroub na tah a upínku na ohyb.

Po vytvoření rovnic se vyjádří ze soustavy rovnic síla ve šroubu, která se porovná s teoretickým vzorcem pro sílu ve šroubu. Z tohoto porovnání se vyjádří dovolená síla v napětí v tahu σ_{DOV} pro šroub.

Vzorec pro výpočet síly ve šroubu[13]

$$F_{\check{s}} = \frac{\pi}{4} \cdot d_3^2 \cdot \sigma_{DOV}$$

$F_{\check{s}}$síla ve šroubu [N]

d_3průměr jádra závitu [mm]

σ_{DOV} dovolené napětí v tahu šroubu [MPa]

Podle zjištěného dovoleného napětí pro šroub se zvolí materiál šroubu upínky. Pro návrh materiálu upínky se vychází z dovoleného napětí v tahu šroubu. Uvažuje se, že upínka je namáhána na ohyb od šroubu. Z konstrukčního hlediska je výhodnější prohnutí upínky, než natažení šroubu. Z hlediska návrhu se volí dovolené napětí v ohybu upínky dvojnásobné, než dovolené napětí v tahu šroubu. [13]

Součastné moderní upínky mají několik konstrukčních prvků, které je dobré při konstrukčním návrhu vhodně použít pro zajištění správného fungování upínky. Upínka by měla mít svůj zámek pro navedení upínky při jejím upínání, dále by měla být konstruována tak, aby byla vytvořena mezera, díky které dojde k předepnutí upínky od upínací síly. Styk upínky s VBD by neměl být pokud možno plošný, z důvodu působení upínací síly do jednoho místa.

Tyto jmenované konstrukční prvky je možno vidět na obrázku 13, kde jsou popsány na upínce od firmy SANDVIK COROMANT.



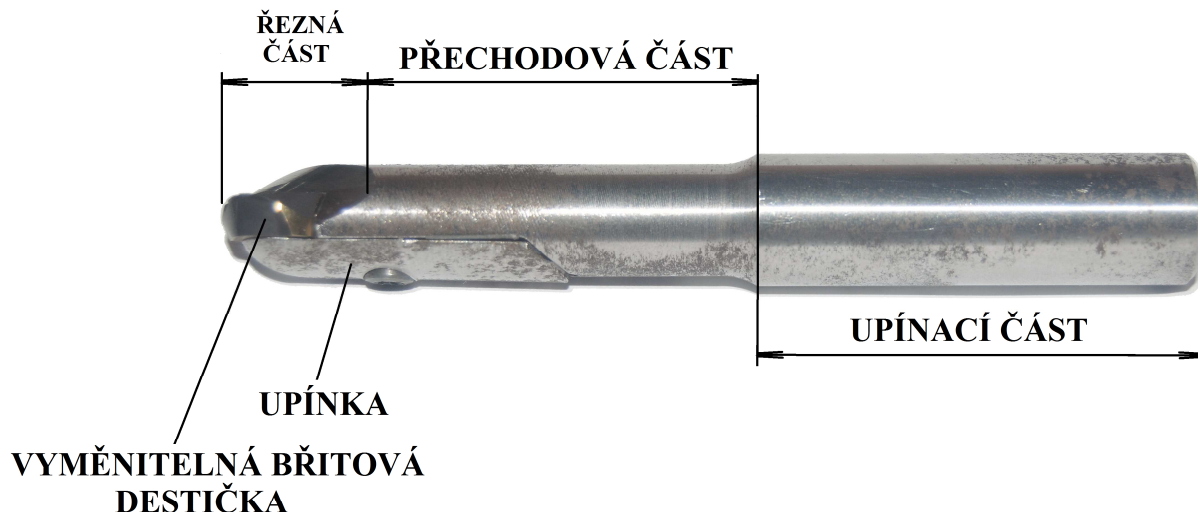
Obrázek 13: Konstrukční prvky upínky od firmy SANDVIK COROMANT

1.6 Lůžko nástroje pro uložení VBD

Lůžko nástroje může být s vyměnitelnou vložkou, nebo monolitní s nástrojem. Lůžko je během obrábění otláčováno, což může vést k následnému nepřesnému uložení VBD a tím k nepřesnostem, které by bylo nezbytné řešit pomocí korekcí nástroje. Při konstruování vyměnitelného lůžka nástroje jsme limitováni potřebným místem za destičkou. Vyměnitelné lůžko se dále volí u nástrojů s velkou vytížeností, ve velké míře u nástrojů pro hrubování. Pro kulové frézy určené pro kopírovací frézování je toto řešení nerealizovatelné z důvodu limitace místem. Lůžko pro uložení VBD z řezné keramiky mi mělo mít konstrukční prvky, sloužící k navedení destičky do správné pozice do lůžka. Předchází se tak k nepřesnému naistalování destičky do nástroje a k časovým ztrátám způsobených dlouhým ustalováním destičky do nástroje. Konstrukční prvky pro navedení destičky do nástroje musí být konstruovány s ohledem na tvar samotné destičky. Je vhodné využít samotného tvaru, popř. navrhnout úpravu destičky, která nesmí destičce bránit v její funkci. Na dně lůžka je důležité vytvořit zápch pro zajištění dosednutí VBD do lůžka.

1.7 Tělo nástroje [9]

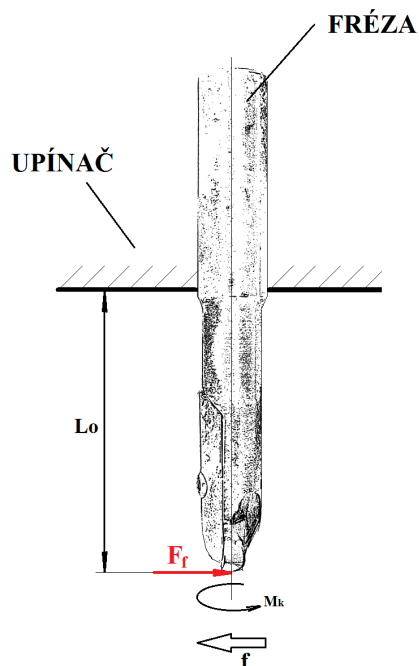
Tělo kulové frézy s VBD z řezné keramiky se skládá z upínací části a přechodové části nástroje, kterou spojuje upínka s řeznou částí nástroje. Tu představuje VBD s jejím uložením.



Obrázek 14: Tělo kulové frézy s popisem základních částí

1.7.1 Namáhání těla nástroje

V oddílu 1.5 a 1.6 byla podrobněji popsána řezná část nástroje, která je hlavní funkční částí frézy. Přechodová část nástroje slouží pro přechod mezi upínací částí upínky a řezné části upínky. Celková délka nástroje ovlivňuje celkovou tuhost nástroje. Nástroj je namáhán kroučícím momentem M_k a ohybovým momentem M_o od síly F_f , která působí proti posuvu f na rameni L_o .



Tělo nástroje se nejdříve kontroluje na ohyb, poté na krut.

Ohybový moment:

$$M_o = F_f \cdot L_o [N \cdot mm]$$

F_f hlavní složka řezné síly namáhající tělo nástroje na ohyb
 L_o vyložení nástroje

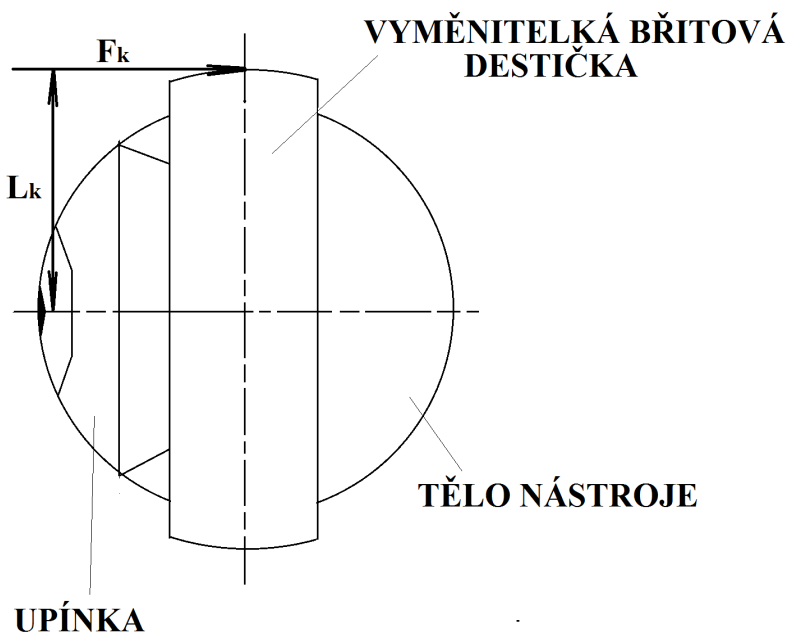
Napětí v ohybu:

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} \leq \sigma_{Do} [MPa]$$

W_o modul průřezu v ohybu

σ_{Do} dovolené napětí v ohybu

Obrázek 15: Namáhání těla nástroje na ohyb [13]



Kroutící moment:

$$M_k = F_k \cdot L_k [N \cdot mm]$$

F_khlavní složka řezné síly
namáhající tělo nástroje na krut

L_kvzdálenost působitě síly F_k od
středu nástroje

Napětí v krutu:

$$\sigma_k = \frac{M_k}{W_k} \leq \sigma_{Dk} [MPa]$$

W_kmodul průřezu v krutu

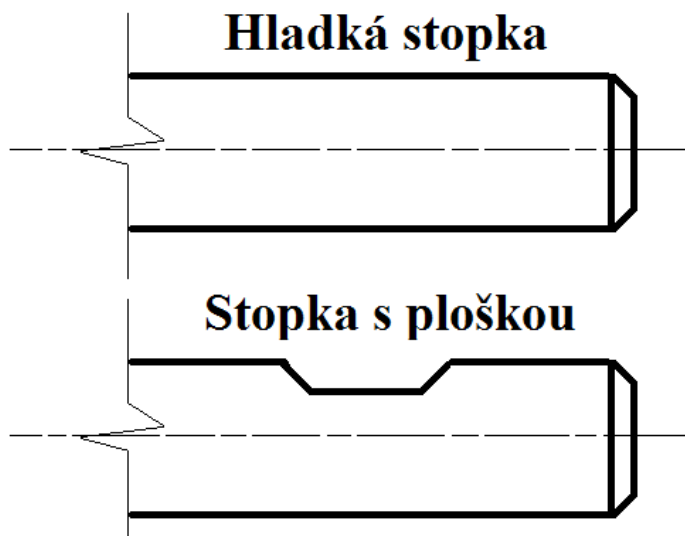
σ_{Dk} dovolené napětí v krutu

Obrázek 16: Namáhání těla nástroje na krut [13]

Další možností kontroly namáhání těla nástroje je pomocí metody konečných prvků MKP.

1.7.2 Stopka nástroje

Tvar stopky nástroje je závislý na typu upínání frézy. Pro kulové frézy se používá obvykle hladká stopka. Hladká stopka může mít na sobě vytvořenou plošku v závislosti na použitém upínání frézy. Stopka s ploškou se používá například pro typ upínání WELDON. Upínání stopky s ploškou se pro nástroje na dokončovací frézování často nepoužívá z důvodu nízké přesnosti a tuhosti upnutí. Síla vyvinutá od upínače musí být dostatečně velká pro zabránění nástroje vyklouznutí z upínače a zabránění protáčení nástroje při obrábění. Základní typy upínačů jsou popsány v kapitole 1.8.



Obrázek 17: Tvary stopek kulové frézy

1.7.3 Materiál těla nástroje

Materiál těla nástroje je závislý na samotné koncepci nástroje. Pokud se jedná o monolitní nástroj, je břit i tělo vyrobené z jednoho kusu (př. nástrojové rychlořezné oceli). Pokud je nástroj s pájenými destičkami nebo s vyměnitelnými břitovými destičkami, je tělo nástroje vyrobeno z konstrukční oceli, která se zušlechtuje na $R_m=1000-1500\text{MPa}$. [13]

1.8 Základní typy upínání nástrojů se stopkou

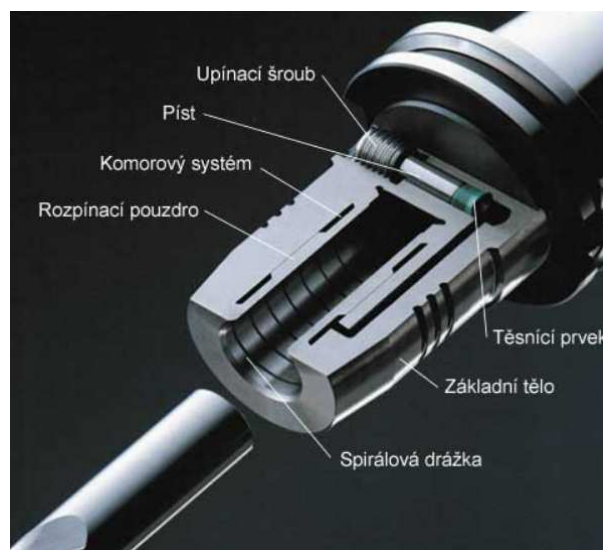
Jelikož se pro nástroje pro dokončovací operace používá převážně hladká stopka, budou v následující kapitole rozebrány základní typy upínání s hladkou stopkou. Jak bylo již zmíněno stopka s ploškou se pro dokončovací operace často nepoužívá, jelikož tento typ stopky není pro přesné upínání. Pro hladkou stopku nástroje se obvykle používá upínání pomocí kleštin, hydraulických a tepelných upínačů.

1.8.1 Upínání pomocí kleštin

Základním typem upínání fréz s hladkou válcovou stopkou je upínání do kleštin. Upínání frézovacích nástrojů pomocí kleštin je přesné a relativně velmi tuhé. Kleština funguje na principu svěrného spoje. Upínací síla vzniká zatlačováním kleštiny do kuželové dutiny nástroje. [15]

1.8.2 Upínání pomocí hydraulického upínače

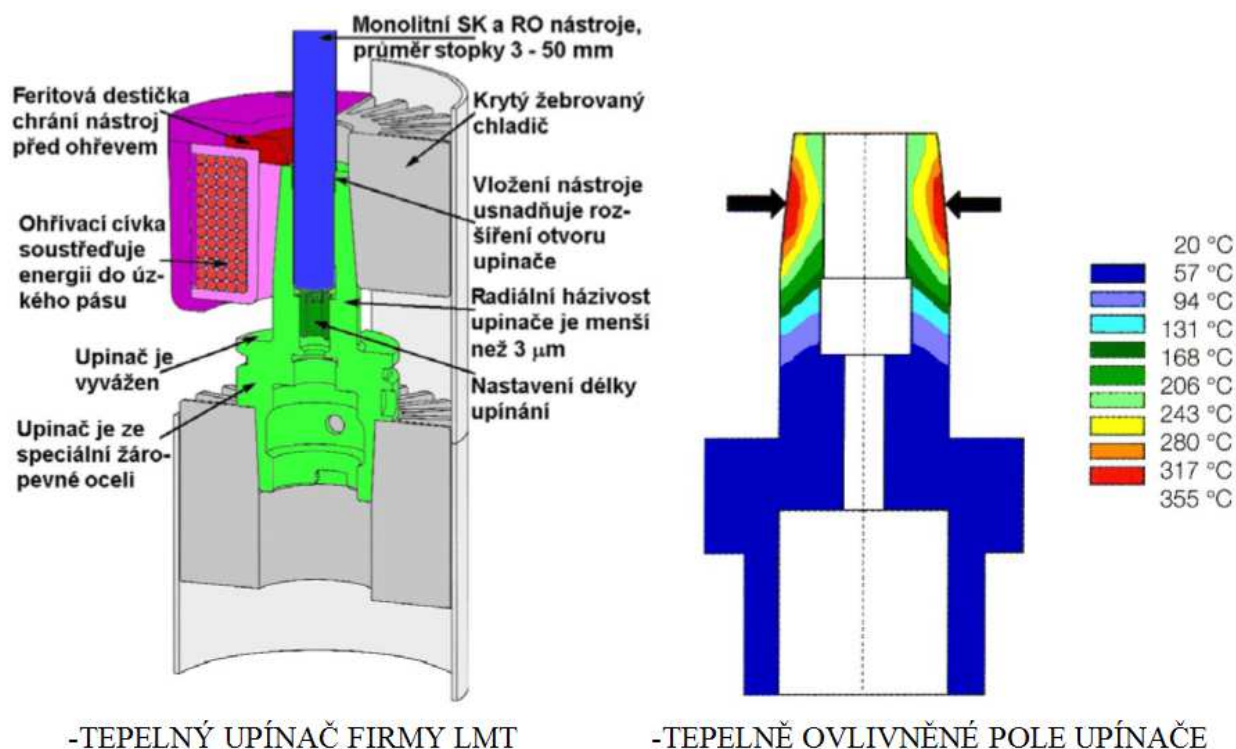
Hydraulické upínání funguje na principu změny tlaku v dutině upínače. Upínání je ovládáno pomocí redukčního šroubu. Při jeho zašroubování se stlačuje píst upínače, čímž se zvyšuje tlak v dutině. Zvýšením tlaku v dutině se pouzdro deformuje. Vlivem deformace pouzdra je vyvozena upínací síla. Pouzdro v místě styku s nástrojem má vyrobené drážky pro odvod nečistot a pro zajištění co nejlepšího materiálového styku. [16]



Obrázek 18: Hydraulický upínač Schunk – TENDO [17]

1.8.3 Upínání pomocí tepelných upínačů

Tento druh upínače pracuje na principu smrštění materiálu. Nástroj je vložen do upínače, ve kterém je zahříván cívkou vysokofrekvenčního generátoru. Vlivem rychlého ohřívání nedojde k tak velkému tepelnému ovlivnění nástroje. Nástroj je poté rychle ochlazen proudem vzduchu. K vyvození upnutí dojde díky smrštivosti materiálu upínače. [16]



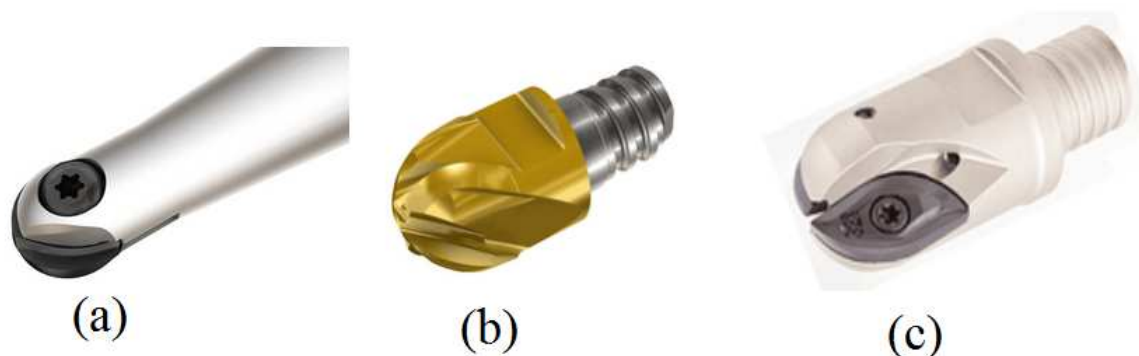
Obrázek 19: Tepelný upínač [16]

1.9 Současný stav moderních kulových fréz nabízených na trhu

Převážná část současných kulových moderních fréz nabízených na trhu se vyrábí ze slinutého karbidu. V současnosti se řezná keramika používá více pro frézovací hlavy. Pro samotné kopírovací frézy není nabídka rozšířena. V následující části je možné najít výběr typů kulových fréz nabízených od současných vybraných výrobců.

ISCAR

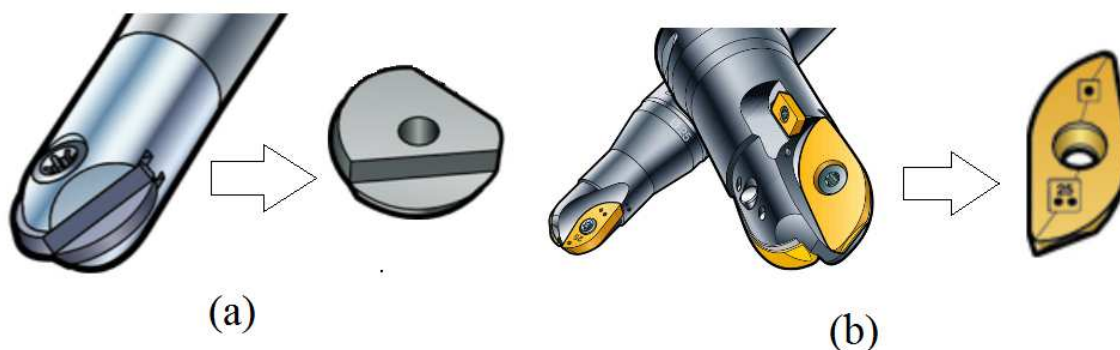
V současnosti firma Iscar nabízí kulové frézy převážně ze slinutého karbidu. Použité je upínání speciální celistvé vyměnitelné břitové destičky pomocí centrálního šroubu (vlevo na obrázku 20), vyměnitelná kulová hlavice, která se upíná na nástroj pomocí závitů (uprostřed na obrázku 20) a kulové frézy s dvěma až třemi speciálními VBD, kdy každá destička tvoří jeden břit (vpravo na obrázku 20).



Obrázek 20: Typy kulových fréz z vyměnitelnými elementy od firmy ISCAR [20]

SANDVIK COROMANT

Tato firma nabízí kulovou frézu se speciální VBD s centrálním upínacím šroubem (vlevo na obrázku 21) a frézu s dvěma speciálními VBD, z nichž každá tvoří jeden břit (vpravo na obrázku 21), oba typy fréz jsou ze slinutého karbidu.



Obrázek 21: Typy kulových fréz s vyměnitelnými elementy od firmy SANDVIK COROMANT[3]

PRAMET

Česká firma Pramet nabízí kulové frézy se speciálními dvoudílnými (obrázek 22) nebo třídílnými (obrázek 22) VBD ze slinutého karbidu s negativní geometrií břitu.



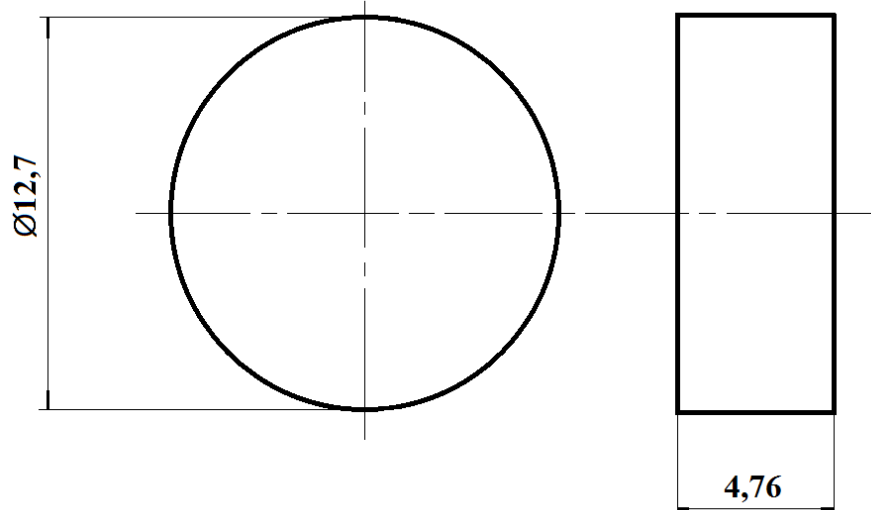
Obrázek 22: Typy kulových fréz s vyměnitelnými elementy od firmy PRAMET [19]

2 Návrh frézovacího nástroje ve variantách

Předmětem konstrukčního návrhu je kulová fréza s VBD pro řeznou keramiku s negativní geometrií. Pro návrh nástroje byl použit program CATIA V5R20.

Pro návrh byla zadána kruhová VBD od firmy ISCAR z řezné keramiky IW 7.

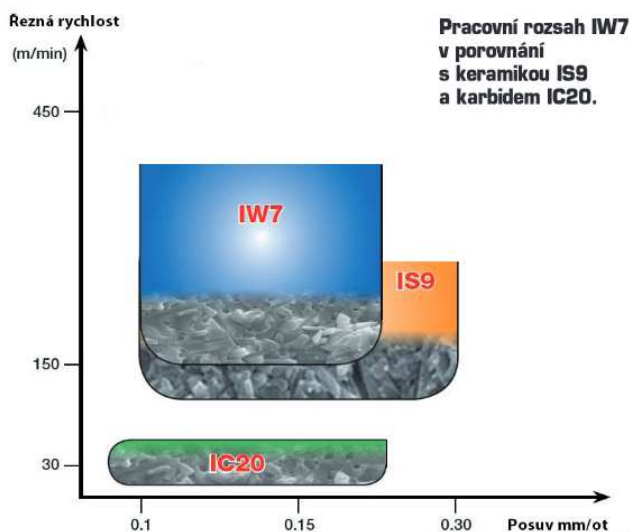
Označení destičky : **RNGN 120400T IW7**



Obrázek 23: Rozměry zadané VBD od firmy ISCAR

Materiál IW7

Tento druh řezné keramiky byl vyvinut pro přerušovaný i dokončovací řez. Řezná keramika s označením IW 7 je zpevněna pomocí whiskerových vláken SiC. Při testech tohoto materiálu byl zaznamenán až 8 násobný objem odebraného materiálu v porovnání s karbidy. Tento typ řezné keramiky je vhodný pro vysokopevnostní těžkoobrobitelné materiály jako jsou např. Inconel 718 nebo Waspalloy. Jedna z jeho mnoha předností je vysoká pevnost při tepelném zatížení a vyšší řezná rychlost ve srovnání s ostatními druhy řezné keramiky od firmy Iscar (srovnání je možno vidět na obrázku 24). [19]



Obrázek 24: Porovnání řezných podmínek jednotlivé řezné keramiky od firmy ISCAR [20]

2.1 Problematika řešení

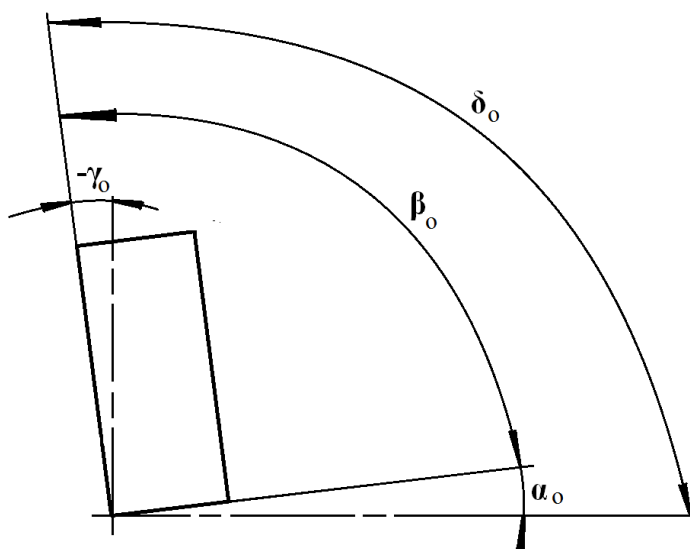
Hlavní problém řešení návrhu zadané kulové frézy je uložení VBD, kde samotné upnutí je limitované malou velikostí destičky. Destička musí být upnuta tak, aby nebyl nástroj limitován při polohování do stran a aby samotná technologie upnutí nezasahovala do prostoru řezu frézy. Lůžko nástroje společně s upnutím destičky musí být navrženo tak, aby byla VBD neustále zatlačována do nástroje.

Jelikož je zadána plná VBD kruhového tvaru, dochází při aplikaci této destičky pro kulovou frézu k nulové rychlosti v ose součásti, což vede k vydrolování řezné keramiky v ose nástroje. Tento problém je řešen úpravou VBD.

Zadaná VBD je s negativní geometrií břitu. Destička musí být proto uložena v těle nástroje a vykloněna pro vytvoření úhlu hřbetu. Pro vyklonění v ortogonální rovině je navržen úhel 7° .

2.2 Návrh variant řešení

2.2.1 Geometrie břitu



Obrázek 25: Geometrie břitu VBD uložené v těle nástroje v ortogonální rovině

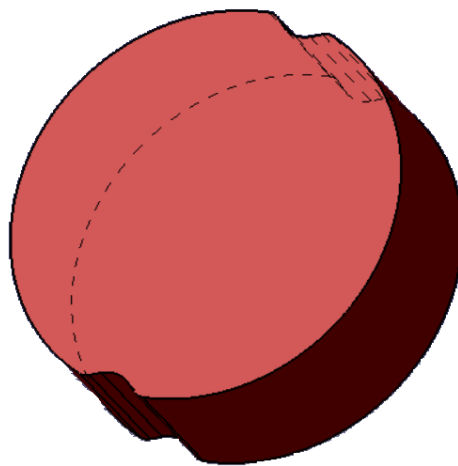
Na obrázku je vidět geometrie břitu VBD v ortogonální rovině, kde je nástroj pro vytvoření úhlu hřbetu vykloněný o úhel α_o , čímž vznikne záporný úhel čela γ_o . Pro náš případ nabývají dané úhly hodnot:

úhel hřbetu	$\alpha_o = 7^\circ$
úhel břitu	$\beta_o = 90^\circ$
úhel čela	$\gamma_o = -7^\circ$
úhel řezu	$\delta_o = 97^\circ$

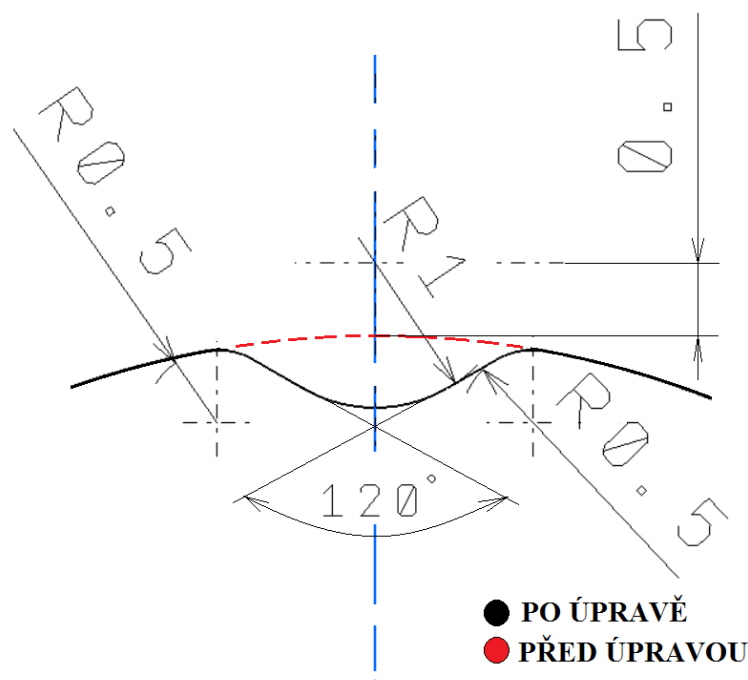
Tabulka 7: Velikosti jednotlivých úhlů v ortogonální rovině

2.2.2 Úprava VBD

V důsledku nulové rychlosti v ose nástroje, která by měla za příčinu případné vydrolování řezné keramiky, byla navržena úprava VBD. Nejprve byly předpokládány 3-4 vybrání. Toto řešení se ukázalo jako nerealizovatelné při následném návrhu lůžka pro destičku. Ve finální variantě řešení úpravy vyměnitelné břitové destičky byla navržena dvě vybrání, která nám zabrání obrábění nástroje v místě osy nástroje. Při prvním návrhu byla předpokládána čtyři vybrání, poté tři vybrání. Obě tyto varianty byly zavrhnuty v důsledku nerealizovatelnosti jejich funkčnosti. V konečném důsledku byly realizovány na všechny varianty nástrojů dvě vybrání VBD, díky kterým je nástroj použitelný čtyřnásobně (destička je použitelná oboustranně a na každou stranu dvakrát). Navržená vybrání plní funkci vedení destičky do lůžka nástroje pro rychlejší ustálení destičky a zaručení tak dostačující geometrie břitu nástroje.



Obrázek 26: Úprava VBD



Obrázek 27: Detail úpravy VBD

2.2.3 Úpravy lůžka nástroje

Lůžko nástroje je upraveno k zajištění správného dosednutí vyměnitelné břitové destičky do lůžka a zajištění správné polohy VBD v lůžku nástroje.

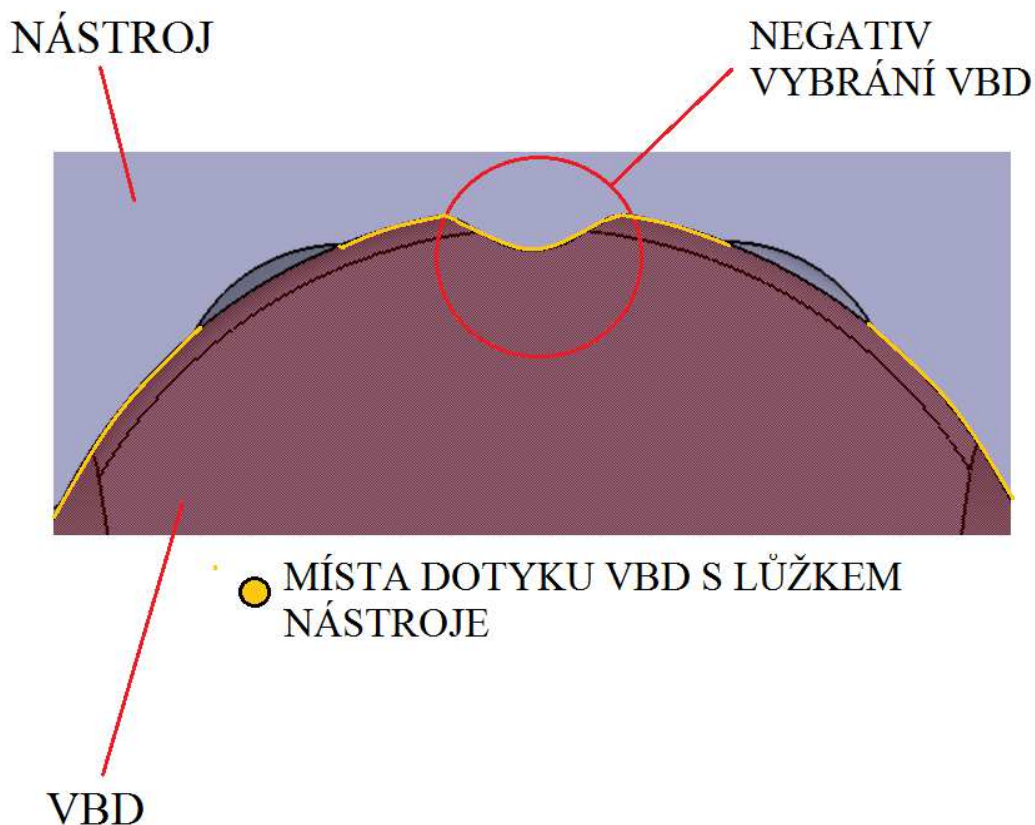
2.2.3.1 Úprava pro správné dosednutí VBD

Pro zajištění správného dosednutí vyměnitelné břitové destičky do lůžka bylo vytvořeno vybrání dna lůžka, jelikož by hrana VBD nikdy správně nedosedla do dna lůžka. Toto vybrání je z počátku ve tvaru malého zahloubení. V průběhu analýzy metodou konečných prvků MKP výsledného modelu je dále upraveno k co nejlepší idealizaci tvaru.

Vyměnitelná břitová destička se dotýká ve svém průměru lůžka na třech místech, což udává polohu vyměnitelné břitové destičky.

2.2.3.2 Úprava pro navedení VBD do lůžka

Pro navedení vyměnitelné břitové destičky do nástroje je v lůžku vytvořen negativ vybrání destičky, který nám společně s trojdotykem určuje polohu VBD. Tato úprava nám zkracuje čas pro ustálení destičky do nástroje.



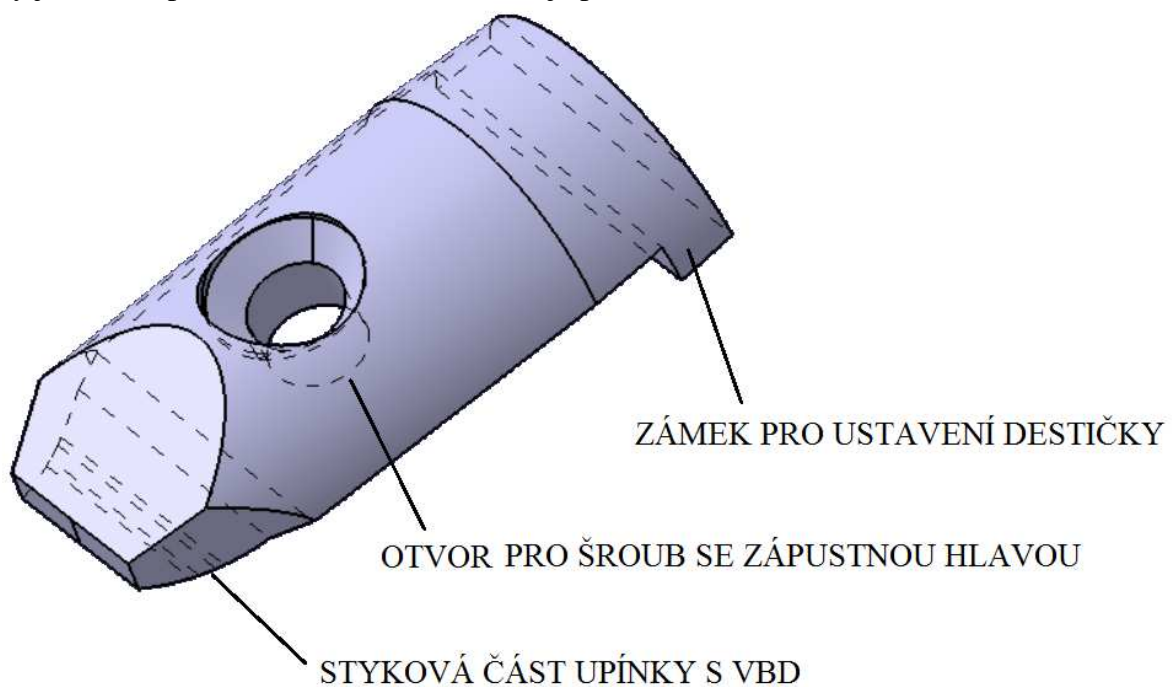
Obrázek 28: Úpravy lůžka k navedení VBD

2.2.4 Varianta řešení 1

První návrh varianty upnutí VBD vychází z upínání destiček z řezné keramiky do frézovacích hlav. Upínání destičky je realizováno pomocí upínky. Upínací síla je aplikována pod úhlem 5° tak, aby destička byla neustále držena v lůžku nástroje.

2.2.4.1 Návrh upínky pro variantu č. 1

Na obrázku 29 je možno vidět navrženou upínku pro první variantu řešení. Styková část upínky s VBD je upravena tak, aby výsledná upínací síla F_u byla vedena z důvodu usměrnění upínací síly do jednoho místa (co nejmenší plochy), což zvyšuje tlak vyvinutý na vyměnitelnou břitovou destičku. Upínka je upnuta pomocí šroubu se zápusťnou hlavou, který je veden oproti kolmici k ose těla nástroje pod úhlem 12° .

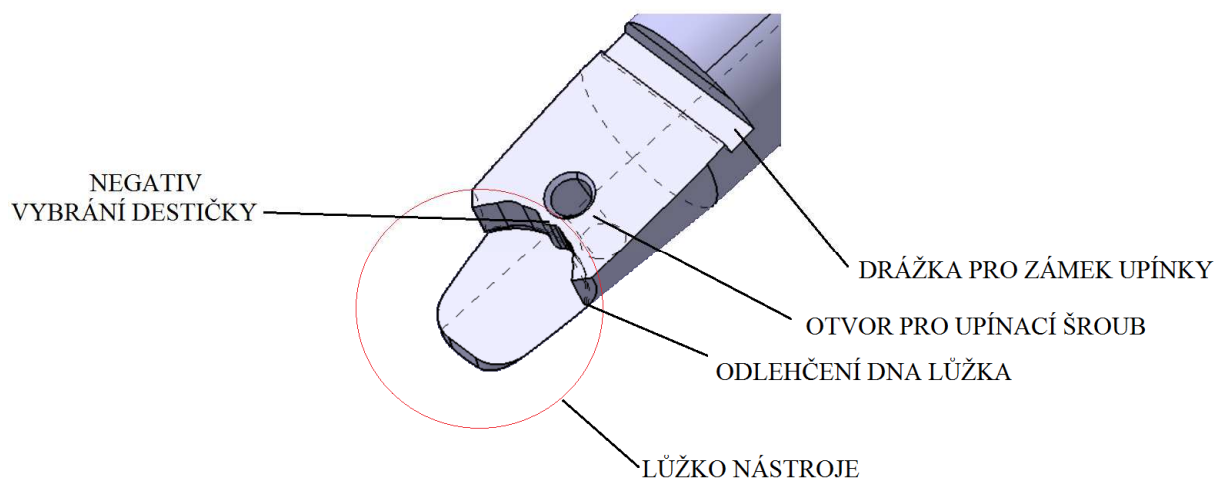


Obrázek 29: Návrh upínky pro variantu č. 1

Zámek pro ustálení při upínání upínky do těla nástroje je veden rovnoběžně s upínací silou. Mezi zámkem a místem styku upínky s destičkou je vytvořena mezera pro předepnutí upínky od upínací síly šroubu.

2.2.4.2 Lůžko nástroje, upnutí upínky pro variantu č. 1

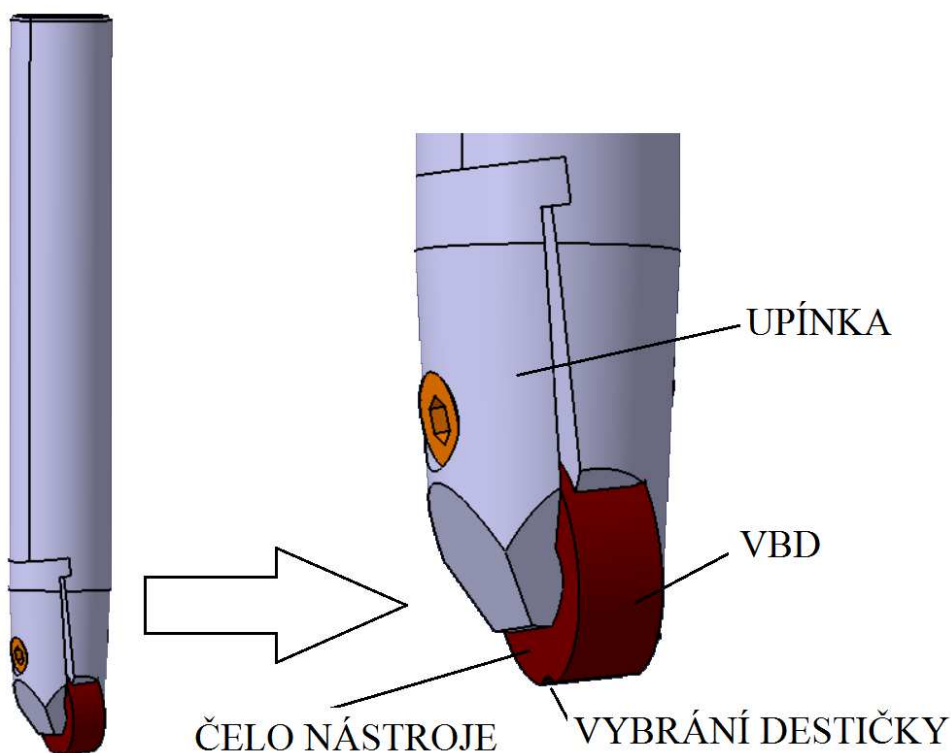
Obrázek 27 znázorňuje řešení lůžka a upínání upínky pro variantu řešení č.1. V lůžku nástroje je vytvořen negativ tvaru vybrání destičky, který slouží pro ustálení destičky do lůžka nástroje. Lůžko nástroje je oproti ose nástroje vykloněno o 7° z důvodu nutnosti vyklonění destičky pro vytvoření úhlu hřbetu. V místě za lůžkem nástroje je vytvořen otvor se závistem M 3,5 pro upnutí upínky do těla nástroje. Dále je zde vytvořena drážka pro zámek upínky, který slouží k navedení upínky do těla nástroje. Dno lůžka je odlehčeno pro dosednutí destičky do lůžka.



Obrázek 30: Lůžko nástroje, upínání upínky pro variantu řešení č. 1

2.2.4.3 Tělo nástroje, sestava nástroje pro variantu č. 1

Na obrázku 31 je znázorněn izometrický pohled na sestavu nástroje, která se skládá z těla nástroje, vyměnitelné břitové destičky, upínacího šroubu a upínky. Destička je ustálena svoji špičkou do osy nástroje. Poloha upínky oproti geometrii nástroje je situována tak, aby síly vzniklé při obrábění působily směrem do nástroje.



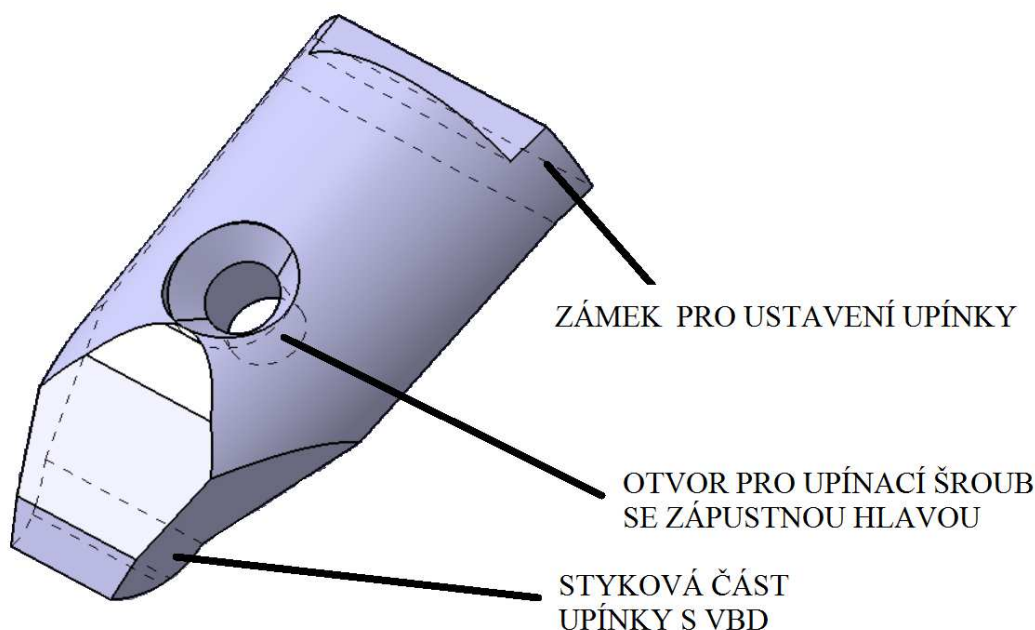
Obrázek 31: Sestava nástroje pro variantu řešení č. 1

2.2.5 Varianta řešení 2

Koncepce varianty řešení č. 2 vychází z řešení varianty č. 1. Upínání destičky je v tomto případě opět řešeno pomocí upínky. Upínka je však konstrukčně pozměněna. Řešení zámku pro ustavení upínky do nástroje je odlišné. Upínací síla je vedena pod menším úhlem než v případě č.1.

2.2.5.1 Návrh upínky pro variantu č. 2

Na obrázku 32 je návrh upínky pro variantu řešení č. 2. Hlavní rozdíl mezi první a druhou variantou řešení je v řešení zámku upínky, který je veden v tomto případě kolmo na upínací sílu. Mezera pro předepnutí upínky je zde vytvořena odsazením zámku oproti místě styku s upínkou.

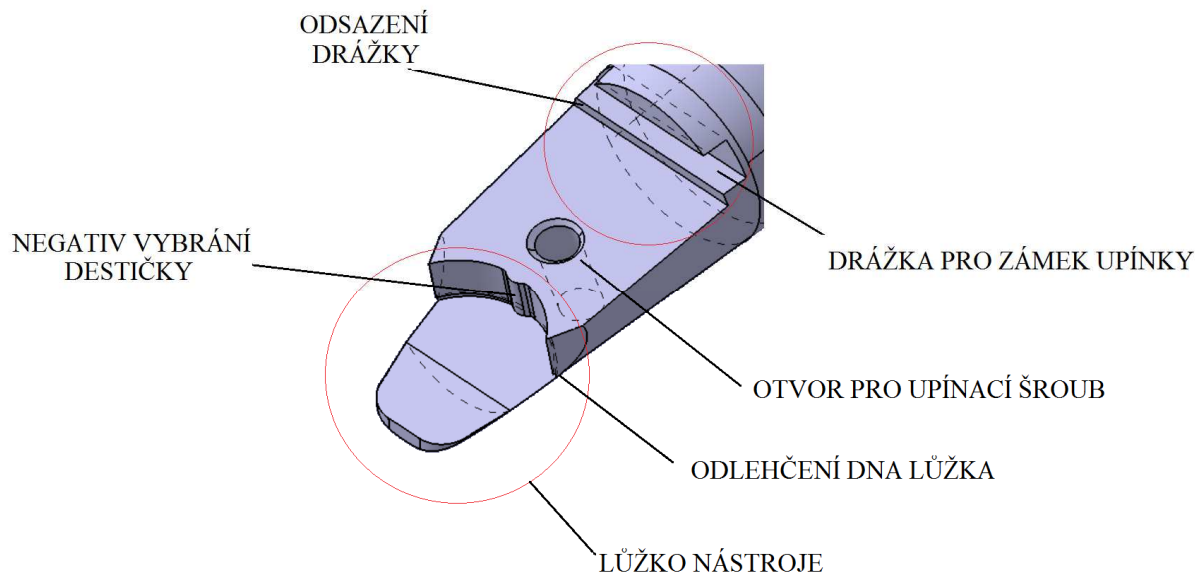


Obrázek 32: Návrh upínky pro variantu č. 2

Styková část upínky s VBD je opět vedena do jednoho místa pro usměrnění upínací síly do co nejmenší plochy. Otvor pro upnutí vyměnitelné břitové destičky je opět veden pod úhlem tak, aby byla destička držena neustále v lůžku nástroje.

2.2.5.2 Lůžko nástroje, upnutí upínky pro variantu č. 2

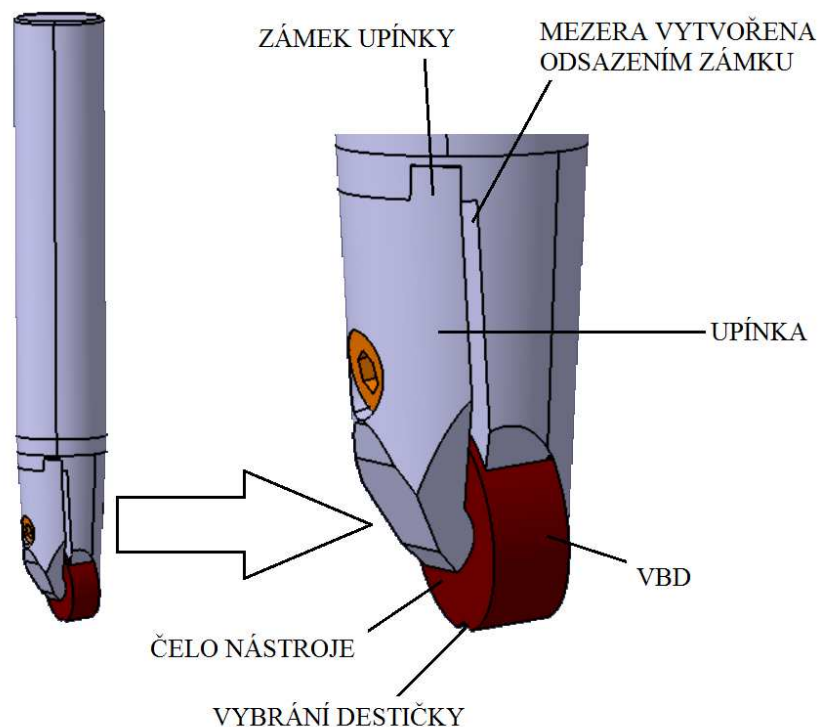
Na obrázku 33 je znázorněno lůžko nástroje pro variantu řešení č. 2. Lůžko je koncipováno stejným způsobem jako ve variantě č.1. Konstrukční změny jsou minimální, v ose lůžka je vytvořen negativ vybrání VBD pro ustálení destičky do lůžka. Samotné lůžko a místo pro uchycení destičky je oproti ose nástroje vykloněno o 7° . Dno lůžka je odlehčeno pro dosednutí destičky do lůžka. Hlavní rozdíl mezi variantou č. 1 a č. 2 je v návrhu drážky pro zámek upínky. Drážka je zde vedena kolmo na upínací sílu. Je odsazena pro vytvoření výsledného předepnutí upínky od upínací síly. Mezi lůžkem nástroje a drážkou pro zámek upínky je otvor pro upnutí upínky do nástroje.



Obrázek 33: Lůžko nástroje, upínání upínky pro variantu řešení č. 2

2.2.5.3 Tělo nástroje, sestava nástroje pro variantu č. 2

Obrázek 34 znázorňuje sestavu varianty řešení č. 2, která se skládá z upínky, tělesa nástroje, vyměnitelné břitové destičky a upínacího šroubu. Zajímavý je odlišný způsob zámku upínky, který je oproti variantě řešení č. 1 otočen o 90°.



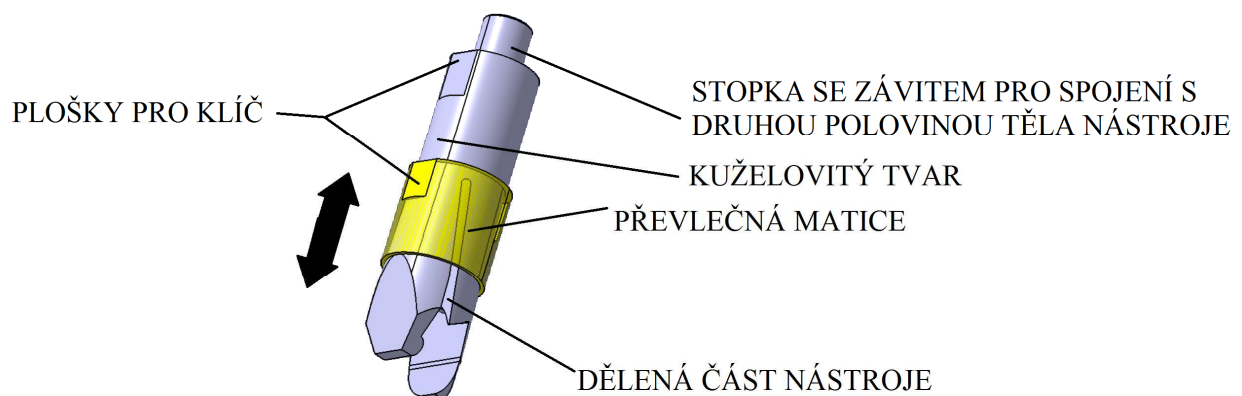
Obrázek 34: Sestava nástroje pro variantu řešení č. 2

2.2.6 Varianta řešení 3

Třetí návrh řešení je založen na odlišném principu, než předešlé dvě varianty řešení. Upínací síla zde není vytvořena pomocí upínky s upínacím šroubem, ale na principu svěrného spoje .

2.2.6.1 Návrh upínání pro variantu č. 3

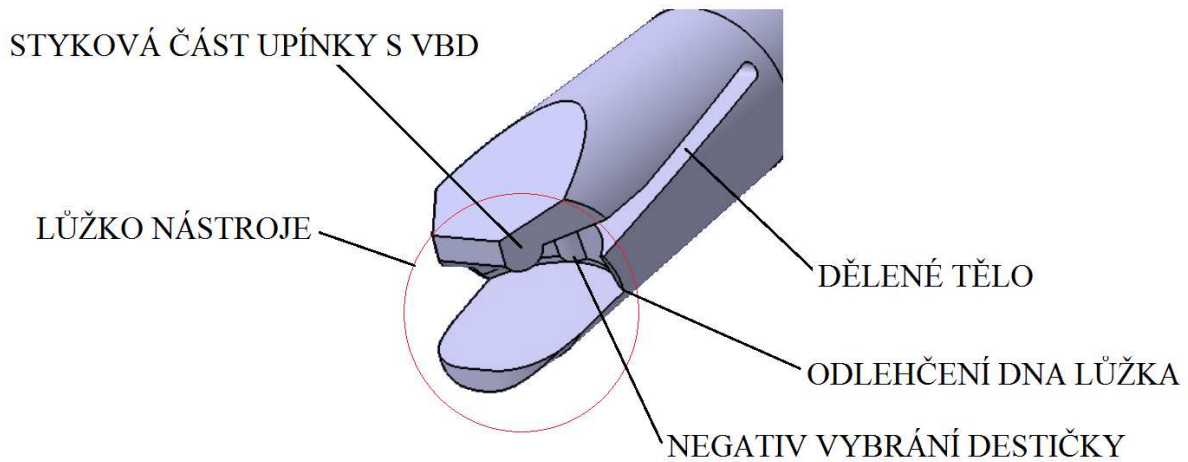
Upínání pro variantu řešení č. 3 je řešeno pomocí svěrného spoje, kde samotné tělo nástroje je děleno na dva kusy z důvodu montáže svěrné matice, jelikož druhá část matice je kuželovitého tvaru. Na obrázku 35 je znázorněna část nástroje, která se skládá z svěrné matice a upínací části těla nástroje. Tělo nástroje je děleno pro vytvoření přepnutí od upínací síly. Upínací síla je vyvozena pomocí svěrné matice, která se před samotným obráběním zašroubuje, čímž vznikne upínací síla díky kuželovité části těla nástroje a děleného těla nástroje (matice stahuje dělené tělo k sobě). Matice a stopka se závitem mají závit s opačným směrem než je smysl obrábění. Celá soustava je tedy neustále během obrábění dotahována. Pro snadnější montáž a demontáž jsou na matici a upínací části vytvořeny plošky pro klíč.



Obrázek 35: Návrh upnutí pro variantu řešení č. 3

2.2.6.2 Lůžková část nástroje pro variantu řešení č. 3

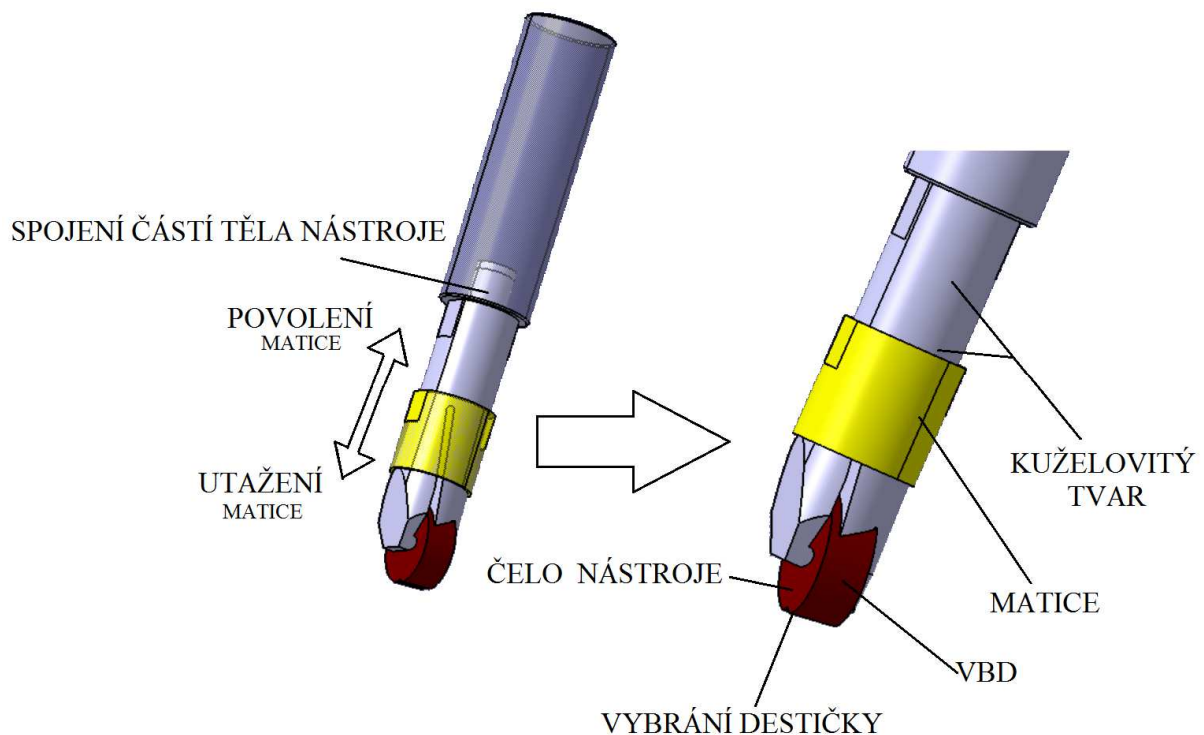
Na obrázku 36 je lůžková část pro variantu řešení č. 3. V ose lůžka je situován negativ vybrání VBD pro ustálení destičky do lůžka nástroje. Lůžková část nástroje je oproti ose vykloněna o 7° . Dno lůžka je odlehčeno pro dosednutí destičky do lůžka. Od lůžka je nástroj dělen pro vytvoření předeprnutí od upínací síly matice. Část těla nástroje, kde se nachází lůžko nástroje, má kuželovitý tvar. Od místa lůžka se kužel zužuje. Při upínání destičky je kuželovitá část maticí stahována, což vede k vyvození upínací síly. Styková část upínky s vyměnitelnou břitovou destičkou je tvořena tak, aby upínací síla byla vedena do jednoho místa destičky.



Obrázek 36: Lůžková část nástroje pro variantu řešení č. 3

2.2.6.3 Tělo nástroje, sestava nástroje pro variantu č. 3

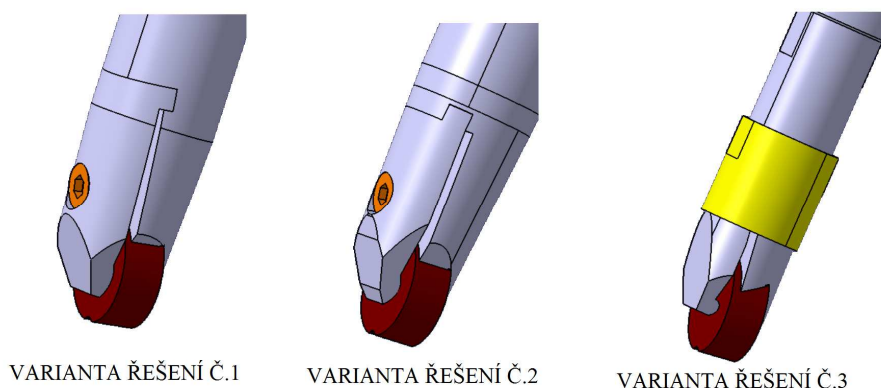
Sestava nástroje pro variantu řešení č. 3 se skládá z upínací části nástroje do stroje, části nástroje pro upínání upínky, svěrné matice a vyměnitelné břitové destičky. Dvě hlavní části těla nástroje jsou spojeny pomocí stopky se závitem, která je při obrábění neustále dotahována. Nástroj je dělen z důvodu montáže svěrné matice, která slouží pro vyvození upínací síly. Matice stahuje upínací část nástroje. Tato část je kuželovitého tvaru a je dělena.



Obrázek 37: Sestava nástroje pro variantu řešení č. 3

3 Výběr nejvhodnější varianty

Z hlediska porovnání jednotlivých variant jsou první dva návrhy odlišné koncepce než varianta č.3. První dvě řešení jsou realizována pomocí upínky a upínacího šroubu. Třetí varianta je navržena pomocí svěrného spoje. Varianta řešení číslo dvě se liší od varianty číslo jedna převážně v pozici zámku pro upínku a v úhlu otvoru pro vytvoření upínací síly. Hlavní konstrukční hledisko pro porovnání těchto dvou variant je však jen zámek upínky. Úhel vyklonění otvoru pro vytvoření upínací síly má velký podíl na rozložení jednotlivých složek sil od upínací síly. Úhel jde však konstrukčně upravovat s minimálními zásahy do návrhu upnutí. Varianta řešení zámku č.1 je oproti druhé variantě více pevná, tuhá a je relativně méně náchylná k chvění. Funkčnost a vyrobiteľnost obou řešení je srovnatelná. Každé řešení má své klady a zápory. Varianta řešení číslo 3 je založena na teoretickém návrhu, kdy tento princip upínání není v běžné praxi viditelný. V porovnání s variantou řešení č.1 a 2 je tělo nástroje děleno v polovině z důvodu montáže svěrné matice. Samotná upínací síla je vyvozena pod maticí, která je neustále dotahována na upínací část těla nástroje. Je dělena a má kuželovitý tvar. Z hlediska funkčnosti je varianta dostačující. Návrh řeší hlavní problematiku řešení zadání. Výsledná aplikovatelnost návrhu v praxi však není z hlediska tuhosti upnutí dostačující. Součástí sestavy jsou dva šroubové spoje, které mají opačný smysl otáčení než je smysl obrábění. Při volném běhu stroje jsou tedy oba šroubové spoje dotahovány. Při obrábění však na nástroj působí dynamické účinky řezných sil, které mají záporný vliv na dotahování šroubových spojů. Při aplikaci nástroje pro řeznou keramiku je nebezpečí uvolňování šroubových spojů v důsledku působení těchto sil.



VARIANTA ŘEŠENÍ Č.1

VARIANTA ŘEŠENÍ Č.2

VARIANTA ŘEŠENÍ Č.3

Tabulka 8: Varianty řešení návrhu kulové frézy

Pro výběr nejlepší varianty bylo vytvořeno hodnocení základních prvků nástroje, které zde bylo popsáno. Hodnocení je bodováno od 1-3. Nejvhodnější varianta má nejvíce bodů.

Kritérium	Varianta č. 1	Varianta č. 2	Varianta č. 3
Tuhost upnutí	3	2	1
Náchylnost k chvění	3	2	1
Pevnost	3	2	1
Funkčnost	3	3	2
Vyrobiteľnost	2	2	1
Celkem	14	11	6

Tabulka 9: Hodnocení variant řešení

Z hlediska hodnocení návrhu byla vybrána varianta řešení číslo 1. Tato varianta je dále podrobena podrobnějšímu návrhu.

4 Zpracování nejvýhodnější varianty

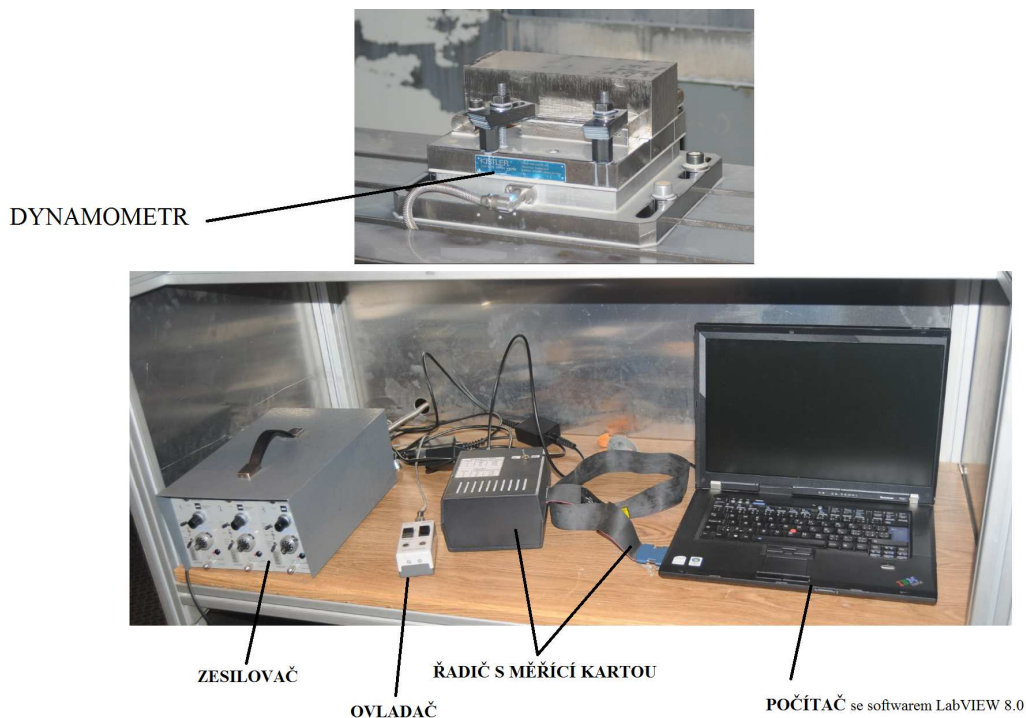
Nejvýhodnější varianta pro další zpracování byla vybrána varianta řešení číslo 1. Pro zjištění orientační upínací síly, kterou je zapotřebí vyvinout, byl vytvořen experiment měření řezných sil na kulové fríze pomocí dynamometru. Z daných výsledků se dále pokračovalo k podrobnějšímu návrhu.

4.1 Experiment: měření řezných sil na kulové fríze pomocí dynamometru

V důsledku návrhu upínky pro VBD byl navržen experiment: měření řezných sil na kulové fríze pomocí dynamometru. Experiment byl realizován v dílnách Západočeské univerzity v Plzni - KTO. Obrábění bylo prováděno na stroji MAS MCV 750 a s kulovou frézou ze slinutého karbidu o průměru 12 mm.

Použitá soustava pro měření:

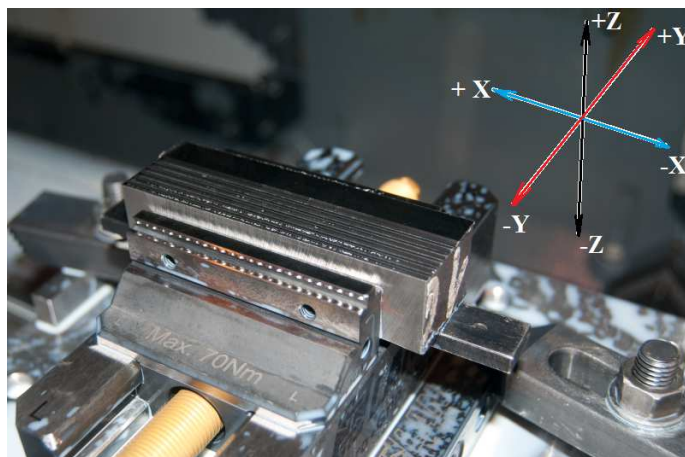
- Třísložkový dynamometr KISTLER 9255 A
- Zesilovač KISTLER 5007
- Sběrná karta typu: PCL 85511
- Měřicí karta PCMCIA DAQ Card 6062E



Obrázek 38: Soustava pro měření řezných sil

CHARAKTERISTIKA FRÉZOVANÉHO MATERIÁLU: 19573

Jedná se o nástrojovou ocel ledeburitickou, chromovanou. Vyznačuje se dobrou houževnatostí, výbornou prokalitelností, rozměrovou stálostí a vysokou pevností v tlaku. [21]



Obrázek 39: Obrázek ustavení vzorku do svěráku s orientací os

Měření č.	v_c [m/min]	a_p [m/min]	f [mm/ot]	n [ot/min]	v_f [mm/min]
1	60,31	0,5	0,08	1600	128
2	60,31	0,5	0,10	1600	160
3	75,39	0,5	0,08	2000	160
4	75,39	0,5	0,10	2000	200
5	94,24	0,5	0,08	2500	200
6	94,24	0,5	0,10	2500	250

Tabulka 10: Řezné podmínky při experimentu

v_c - řezná rychlost, n - otáčky, f - posuv, v_f - posuvová rychlost

Měření č.	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]
1	180,6641	81,0547	207,0312
2	233,3984	113,5254	202,3926
3	215,5762	102,7832	195,5566
4	228,2715	110,3516	211,1816
5	203,6133	101,0742	215,3320
6	221,9238	108,3984	223,1445

Tabulka 11: Zjištěné maximální síly v jednotlivých složkách při měření

F_x - řezná síla v ose x, F_y - řezná síla v ose y, F_z - řezná síla v ose z

Experimentem byly zjištěny orientační síly pro další výpočet upínky. Jelikož byl experiment proveden s nástrojem s destičkou z odlišného materiálu, vynásobíme zjištěnou maximální sílu v každé složce koeficientem bezpečnosti $k=1,5$. Koeficient bezpečnosti eliminuje vzniklé odlišnosti.

Síla	Nejvyšší hodnota [N]
F_x	233,3984
F_y	113,5254
F_z	223,1445

Tabulka 12: Nejvyšší hodnoty sil zjištěné v jednotlivých souřadných osách

Určení výpočtové síly F_{vx}

$$F_{vx} = k \cdot F_x$$

$$F_{vx} = 1,5 \cdot 233,3984$$

$$F_{vx} = 350,1N$$

Určení výpočtové síly F_{vy}

$$F_{vy} = k \cdot F_y$$

$$F_{vy} = 1,5 \cdot 113,5254$$

$$F_{vy} = 170,3N$$

Určení výpočtové síly F_{vz}

$$F_{vz} = k \cdot F_z$$

$$F_{vz} = 1,5 \cdot 223,1445$$

$$F_{vz} = 334,7N$$

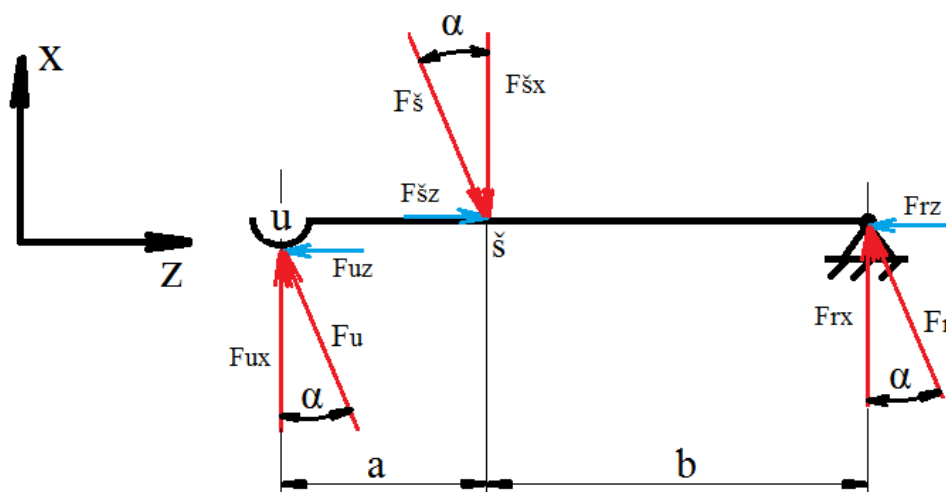
Výpočtové síly F_{vx} , F_{vy} , F_{vz} jsou dále použity pro zatížení modelu nástroje při MKP analýze.

4.2 Návrh materiálů částí nástroje

4.2.1 Návrh šroubu upínky

Na obrázku 40 je možné vidět rozbor sil od upínacího šroubu působících na upínku. Síla od upínacího šroubu F_ξ pod úhlem α má reakce v místě upínání VBD F_u a v místě zámku upínky F_r . Všechny tyto síly (F_ξ , F_u , F_r) lze rozložit na síly v osách x a z. Pro dimenzování šroubu vychází potřebná upínací síla na destičku z rovnováhy sil působících na destičku, pro výpočet uvažujeme $F_{ux}=F_{vx}$. Pro dané síly v jednotlivých osách platí silové a momentové podmínky. Z těchto podmínek se vypočte jedna z nositelek síly ve šroubu F_ξ a dále se dopočte vztah pro sílu F_ξ přes goniometrické funkce. Zjištěná závislost se porovná se vzorcem pro sílu ve šroubu F_ξ . Z tohoto porovnání se odvodí vzorec pro σ_{DOV} (dovolené napětí šroubu v tahu). Po dosazení do výsledné závislosti se vypočte potřebné dovolené napětí šroubu v tahu, podle kterého se určí nejvhodnější materiál šroubu.

Pozn. - hodnoty použité v tomto výpočtu jsou aktuální podle poslední výpočtové analýzy (kapitola 4.3.4.)



Obrázek 40: Rovnováha sil působících na upínku

Výpočet potřebného šroubu pro upnutí

Rovnováha sil v ose x

$$\sum F_x = 0$$

$$(1) F_{ux} - F_{\check{s}x} + F_{rx} = 0$$

Momentová podmínka k bodu \check{s}

$$\sum M_{\check{s}} = 0$$

$$F_{rx} \cdot b - F_{ux} \cdot a = 0$$

$$(2) F_{rx} = \frac{F_{ux} \cdot a}{b}$$

Dosazení vzorce (2) do vzorce (1)

$$F_{ux} - F_{\check{s}} + \frac{F_{ux} \cdot a}{b} = 0$$

$$(3) F_{\check{s}x} = \frac{F_{ux} \cdot (a + b)}{b}$$

Dopočet síly $F_{\check{s}}$ (Obrázek 41)

$$\cos \alpha = \frac{F_{\check{s}x}}{F_{\check{s}}}$$

$$(4) F_{\check{s}} = \frac{F_{\check{s}x}}{\cos \alpha}$$

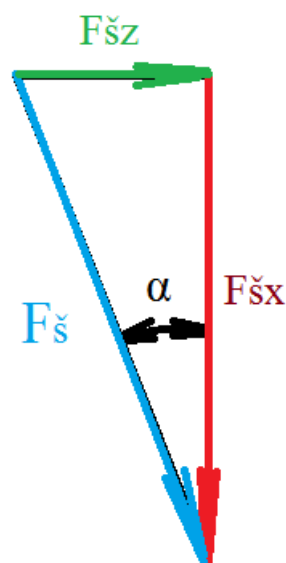
Dosazení vzorce (3) do vzorce (4)

$$F_{\check{s}} = \frac{F_{ux} \cdot (a + b)}{b \cdot \cos \alpha}$$

$$(5) F_{\check{s}} = \frac{F_{ux} \cdot \cos \alpha \cdot (a + b)}{b}$$

Vzorec pro výpočet síly ve šroubu

$$(6) F_{\check{s}} = \frac{\pi}{4} \cdot d_3^2 \cdot \sigma_{DOV}$$



Obrázek 41: Rozklad síly ve šroubu $F_{\check{s}}$

Porovnání vzorce (4) a (5), vyjádření σ_{DOV}

$$F_s = \frac{F_{ux} \cdot \cos \alpha \cdot (a + b)}{b} = \frac{\pi}{4} \cdot d_3^2 \cdot \sigma_{DOV}$$

$$\sigma_{DOV} = \frac{4 \cdot F_{ux} \cdot \cos \alpha \cdot (a + b)}{\pi \cdot b \cdot d_3^2}$$

$$\sigma_{DOV} = \frac{4 \cdot 350,1 \cdot \cos_{12} \cdot (9,1 + 12,3)}{\pi \cdot 12,3 \cdot 3,5^2}$$

$$\sigma_{DOV} = 61,9 \text{ MPa}$$

4.2.2 Určení materiálu šroubu

Z hlediska výběru materiálu šroubu je uvažováno, že šroubový spoj upínání upínky patří mezi vysoce namáhané spoje. Z důvodů eliminace nepřesností se pro tyto spoje volí materiál pevnostní střídy šroubu 10.9 (10K). Do této pevnostní třídy patří dle strojírenských tabulek dva materiály 14240 a 15230. [21]

Materiály šroubu třídy 10.9 (10K) mají dovolené napětí v závitech 200 MPa. Tato třída materiálu šroubu odpovídá vypočtenému napětí. Po konzultaci s odborníky z praxe byl zvolen materiál 15230.7 .

4.2.3 Materiál 15 230

Jedná se o nízkolegovanou ocel, která má dobrou obrobiteľnosť. Ocel je vhodná pro zušlechťování, nitrídování a povrchovému kalení. Používá se pro velmi namáhané strojní části. Pro návrh byl navržen tento materiál v zušlechtěném stavu. [23]

Chemické složení	Chemické složení v %							Tvrdość v zušlechtěném stavu
	C	Mn	Si	Cr	V	P max.	S max.	HRC min.
15230	0,24 až 0,34	0,40 až 0,80	0,17 až 0,37	2,20 až 2,50	0,10 až 0,20	0,035	0,035	359

Tabulka 13: Chemické složení materiálu 15230 [23]

4.2.4 Návrh materiálů upínky

Upínka je namáhána na ohyb. Pro návrh počítáme, že dovolené napětí v tahu šroubu σ_{DOV} bude menší, než dovolené napětí v ohybu upínky σ_{DOV} . Z hlediska konstrukce je výhodnější prohnutí upínky, než natažení šroubu [12]. V praxi se σ_{DOV} volí dvojnásobné:

$$\sigma_{DOV} = 2 \cdot \sigma_{DOV}$$

$$\sigma_{DOV} = 2 \cdot 61,9 \quad [9]$$

$$\sigma_{DOV} = 123,8 \text{ MPa}$$

Pozn.-upínka je ohýbána složkou upínací síly F_{sx}
Pro kontrolu navržené upínky na ohyb platí:

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} \leq \sigma_{DOV}$$

$$\sigma_o = \frac{\frac{F_{sx} \cdot a \cdot b}{a+b}}{W_o} \leq \sigma_{DOV}$$

Vyjádření a dosazení vzorce pro F_{sx} ze vzorce (4)
Dosazení vzorce (6) pro výpočet síly ve šroubu

$$\sigma_o = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot d_3^2 \cdot \sigma_{DOV} \cdot \cos_{\alpha} \cdot a \cdot b}{\frac{a+b}{W_o}} \leq \sigma_{DOV}$$

$$\sigma_o = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot 3,5^2 \cdot 61,9 \cdot \cos_{12} \cdot 9,1 \cdot 12,3}{\frac{9,1+12,3}{59,13}} \leq \sigma_{DOV}$$

$$\sigma_o = 51,5 \leq 125,5$$

Pozn. hodnota W_o byla vypočtena pomocí programu Catia V5R20.

4.2.5 Určení materiálu upínky

Z hlediska výběru materiálu upínky je uvažováno, že bude stejný jako materiál těla nástroje. Pro výběr přichází v úvahu oceli třídy 15 a 16. Tělo nástroje je nejvíce namáháno v místě lůžka nástroje, proto je pro návrh použita ocel třídy 16.

Po konzultaci s odborníky z praxe byl zvolen materiál 16343.7

4.2.6 Materiál 16343

Ušlechtilá, středně legovaná chrom-molybdenová ocel je používána pro vysoce namáhané strojní díly. Vyznačuje se svým dobrým poměrem mezi pevností, mezí kluzu a houževnatostí. Ocel je vhodná k zušlechťování. [24]

Chemické složení	Chemické složení v %							
	C	Si max.	Mn	P max.	S max.	Cr	Mo	Ni
16343	0,30 až 0,38	0,40	0,50 až 0,80	0,025	0,035	1,30 až 1,70	0,15 až 0,30	1,30 až 1,70

Tabulka 14: Chemické složení materiálu 16343 [20]

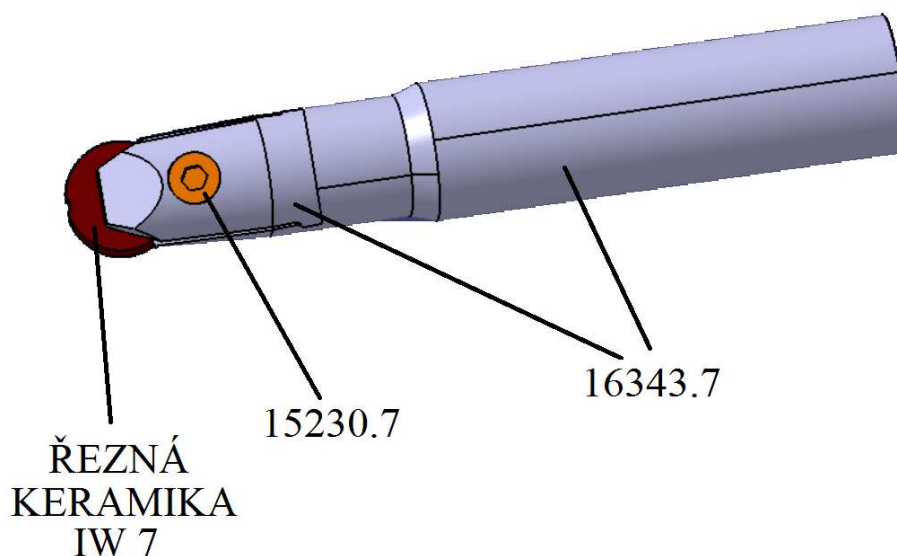
Vlastnost	Hodnota[MPa]
R _{emin}	1000
R _m	1200-1400

Tabulka 15: Mechanické vlastnosti materiálu 16343 v zušlechťeném stavu [24]

4.2.7 Materiál těla nástroje

Z praktických je volen pro tělo nástroje a upínku jednotný materiál. Pro materiál těla nástroje je také zvolena ocel 16343.7, která se používá pro vysoce namáhané strojní části. Kontrola materiálu těla nástroje byla provedena pomocí metody konečných prvků MKP (kapitola 4.5).

4.2.8 Použité materiály



Obrázek 42: Použité materiály jednotlivých částí sestavy nástroje

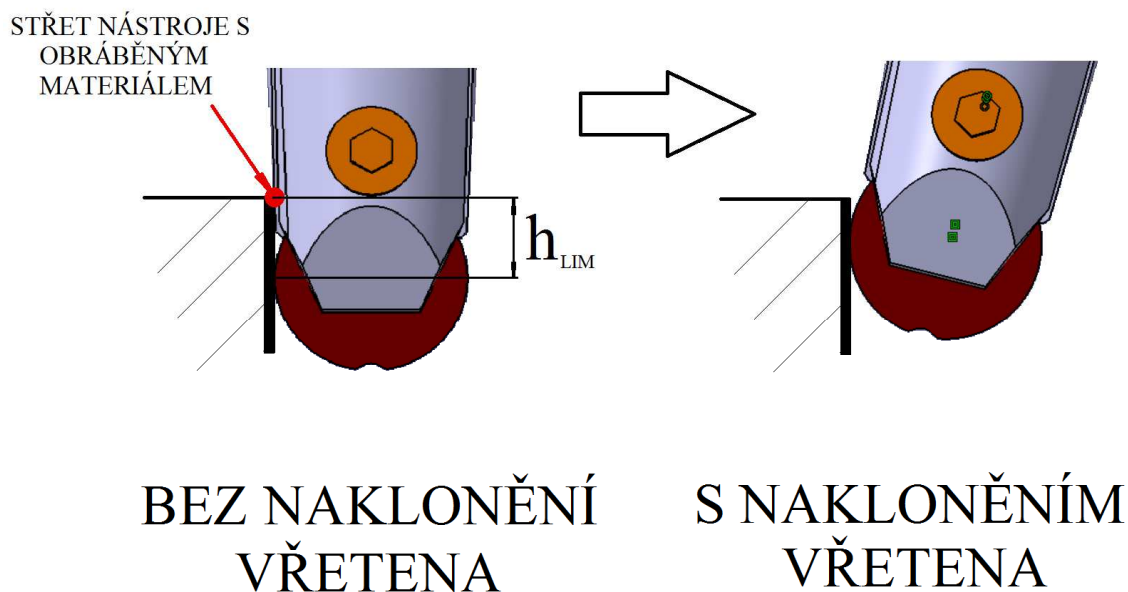
4.2.9 Omezující parametr návrhu

Při návrhu kulové frézy pro řeznou keramiku s negativní geometrií pro danou vyměnitelnou břitovou destičku o průměru 12,7 mm a tloušťky 4,76 mm se vyskytly fakta, která vedou k omezujícím parametrům celkového návrhu dané frézy.

Omezující parametr je zapříčiněn negativní geometrií vyměnitelné břitové destičky. Jelikož bylo zapotřebí destičku vyklonit do lůžka nástroje pod úhlem, došlo tak k zeslabení místa za lůžkem. Pro vyřešení tohoto problému bylo místo za lůžkem zvětšeno využitím kuželové plochy místo kulové plochy.

Kuželovou plochu bylo zapotřebí vytvořit až do průměru 14 mm pro získání většího stoupání kuželu a tím i více materiálu za destičkou.

Tato úprava způsobuje omezení frézování frézy do hloubky. Fréza může frézovat bokem vyměnitelné břitové destičky bezpečně pouze do omezené hloubky h_{LIM} , která je závislá na řezných podmínkách. Při frézování bočních stěn do vyšší hloubky je výhodnější použít obrábění ve více osách. Vřetenem je zapotřebí vyklonit pro zabránění střetu obráběného materiálu s tělem frézy. Při obrábění bočních stěn ve více osách nevzniká omezení nástroje při obrábění.



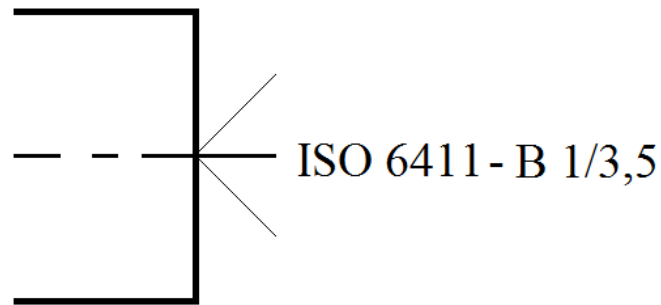
Obrázek 43: Omezující parametr a jeho řešení

Na obrázku 43 jsou znázorněny obě varianty obrábění stěn pomocí navrženého nástroje. Obrázek vlevo znázorňuje variantu s omezujícím parametrem, kdy dochází při frézování bokem frézy při vyšších hloubkách ke kolizi a obrázek vlevo ukazuje dokončování stěny při naklonění frézy.

4.2.10 Doplnující informace návrhu

Středící důlek, upínací část nástroje

Z technologického hlediska je zapotřebí vyrobit do těla nástroje středící důlek, který slouží pro upnutí nástroje při jeho obrábění a následnému broušení. Pro návrh je zvolen středící důlek s ochranných zahloubením.

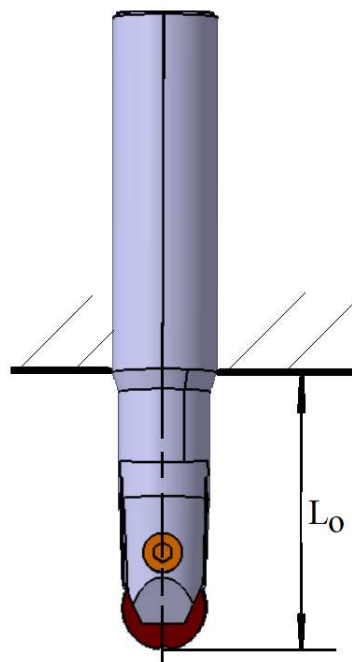


Obrázek 44: Označení středícího důlku[21]

Upínací část nástroje byla změněna na průměr 16mm. Stopka nástroje je navržena hladká. Tolerance průměru d_6 je volena z důvodu možnosti přizpůsobení stopky nástroje pro upínání typu WELDON.

Vyložení nástroje

Při návrhu nástroje bylo uvažováno s vyložení těla nástroje $L_0=42$ mm.

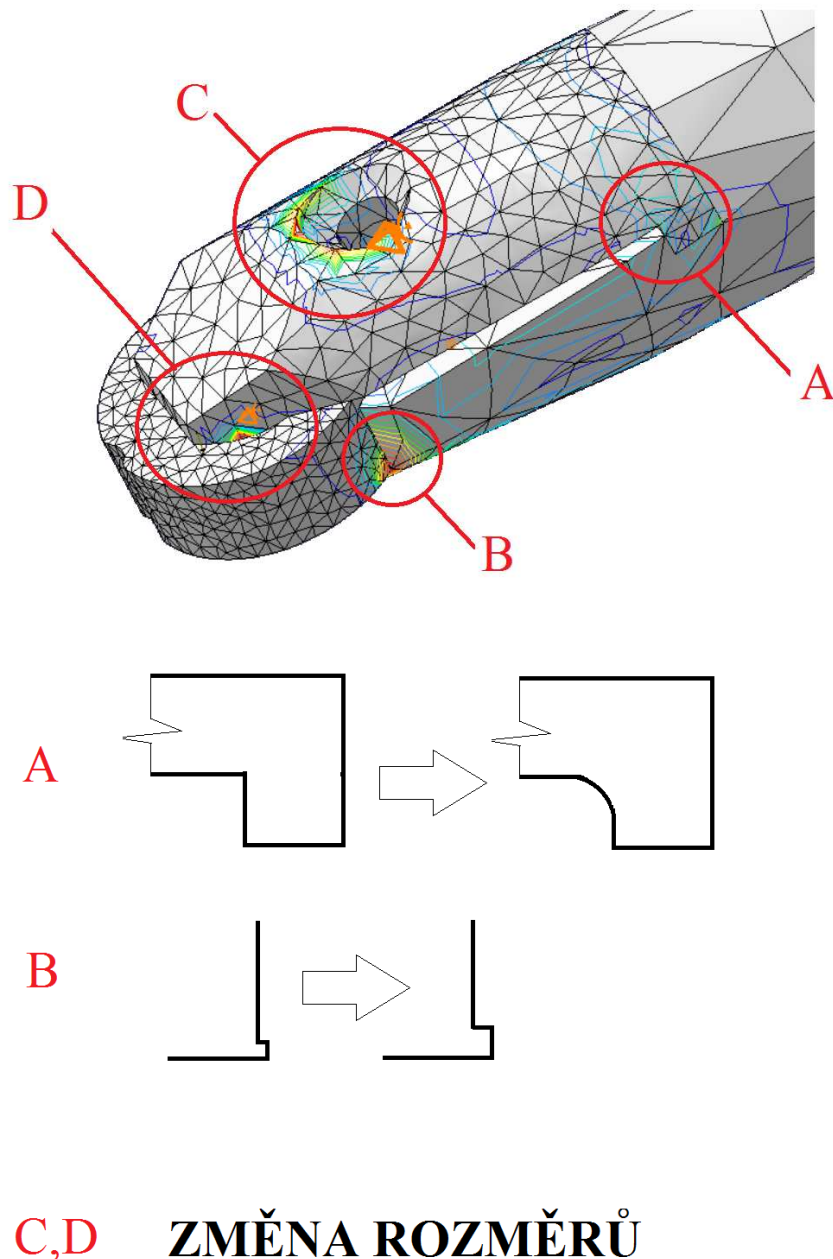


Obrázek 45: Vyložení nástroje

4.3 Analýza návrhu metodou konečných prvků MKP

Během návrhu byla vytipována místa nástroje a upínky, kde je potřebné zjistit velikost lokálního napětí pro podrobnější rozbor. Kritické lokální napětí lze vyřešit zpracováním materiálu a optimalizací rozměrů součásti. Simulace namáhání součásti byla provedena v programu CATIA V5R20.

4.3.1 Předběžný výpočet

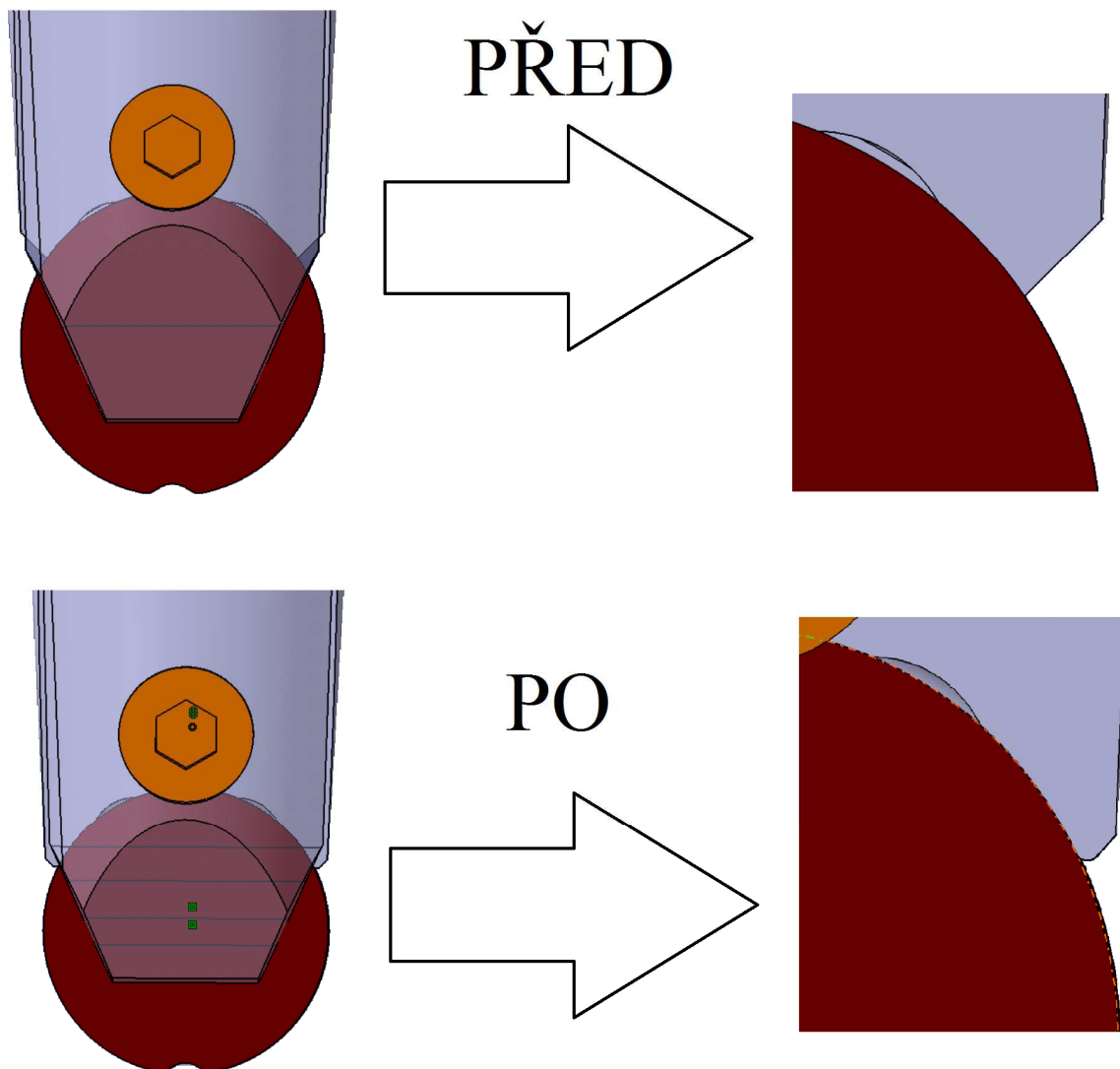


Obrázek 46: Problematická místa řešení, návrh řešení

Na obrázku 46. jsou znázorněna kritická místa návrhu řešení. Během předběžného výpočtu nebyly řešeny přesné hodnoty jednotlivých lokálních napětí. Bylo provedeno hrubé

zasíťování modelu pro další úpravy a následné řešení. Detail A na obrázku znázorňuje akumulaci napětí vzniklou odstrou hranou mezi přechodem zámku a těla upínky. Tento problém je řešen zaoblením hrany na upínce a také zaoblením hrany na těle nástroje. Detail B znázorňuje neproblematictější místo celého návrhu řešení. Byl zde navržen jemný zápich pro dosednutí hrany destičky do těla nástroje. V tomto místě je velká akumulace napětí, v prvotním řešení je zde navržena úprava zápichu. Detaily C a D jsou řešeny pouze úpravou rozměrů součástí, tvarová změna není v těchto případech nutná.

Při zahrnutí dynamických složek sil do předběžného výpočtu se objevil problém s bočním vedením pro vyměnitelnou břitovou destičku, proto bylo před vytvořením výpočtového modelu upraveno boční vedení. Na obrázku 47 je vidět změna bočního vedení.



Obrázek 47: Změna bočního vedení VBD

Před změnou bočního vedení nebylo možné simulovat otáčky nástroje vyšší než 4000 ot/min. Po úpravě se zajistila pozice vyměnitelné břitové destičky v bočním směru a tím se zvýšila tuhost upnutí.

4.3.2 Výpočtový model

Před samotnou detailnější analýzou je nezbytné určit okrajové podmínky výpočtového modelu. Pro určení zatěžující síly F_v působící na nástroj jsou použity síly F_{vx} , F_{vy} , F_{vz} , které byly zjištěny v kapitole 4.1. Experiment: měření řezných sil na kulové fréze pomocí dynamometru.

$$F_{vx} = 350,1 \text{ N}$$

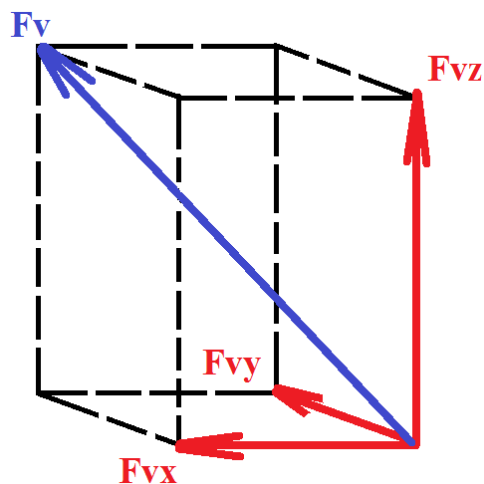
$$F_{vy} = 170,3 \text{ N}$$

$$F_{vz} = 334,7 \text{ N}$$

$$F_v = \sqrt{F_{vx}^2 + F_{vy}^2 + F_{vz}^2}$$

$$F_v = \sqrt{350,1^2 + 170,3^2 + 334,7^2}$$

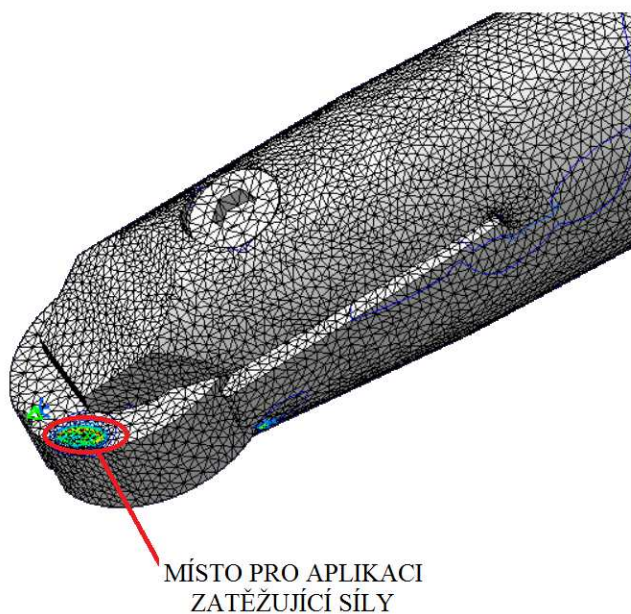
$$F_v = 513,4 \text{ N}$$



Obrázek 48: Určení zatěžující síly F_v

Pro simulaci upnutí upínky pomocí šroubu byl použit utahovací moment 3 N/m [25].
Pro simulaci rotace nástroje byly použity otáčky 7000 ot/min.

Na obrázku 49 je výpočtový model, který byl modifikován pro rychlejší a přesnější výpočet. Na modelu bylo vytvořené jemné zasicování pro minimalizaci chyby řešení na jednotlivých elementech.

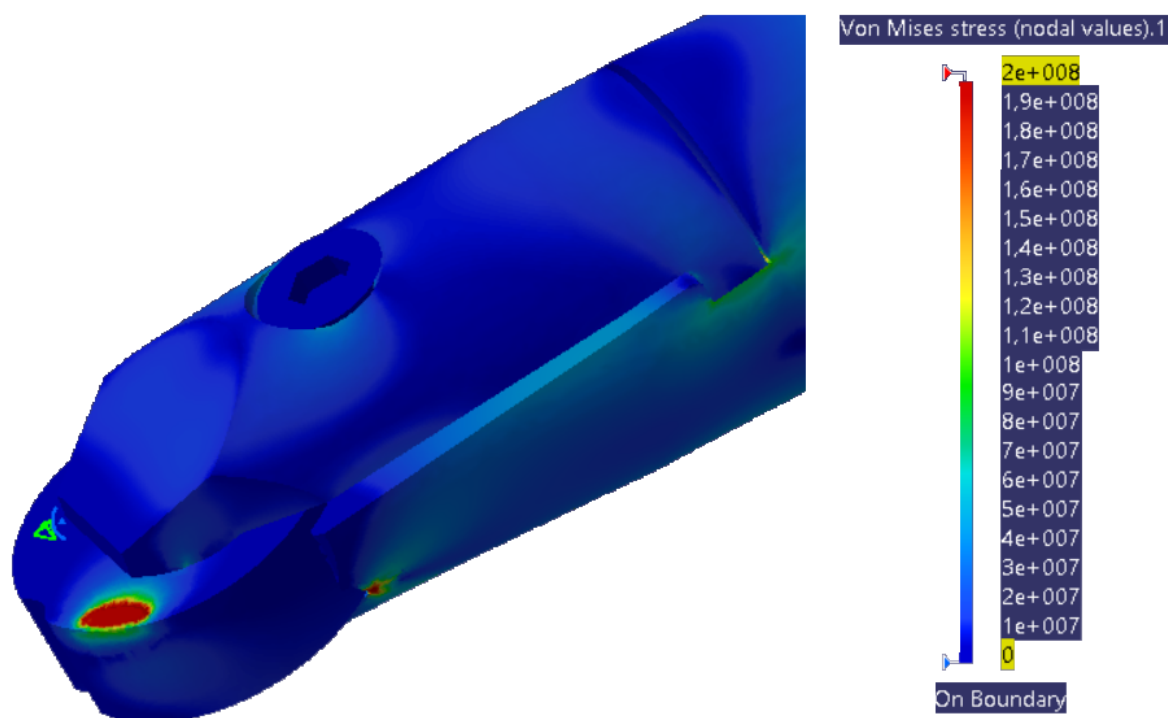


Obrázek 49: Výpočtový model

4.3.3 První analýza

První výpočet je zaměřen na zjištění lokálních napětí v kritických místech součásti. Před touto analýzou byl model součásti upraven na základě předběžného výpočtu, který naznačil kritická místa modelu.

Model před první výpočetní analýzou namáhání součásti byl zatížen zatěžující silou F_v a dynamickou silou od otáčení vřetene stroje, dále byl nasimulován šroub upínky, který byl dotažen předepsaným utahovacím momentem (parametry jsou zmíněny v kapitole 4.3.2)



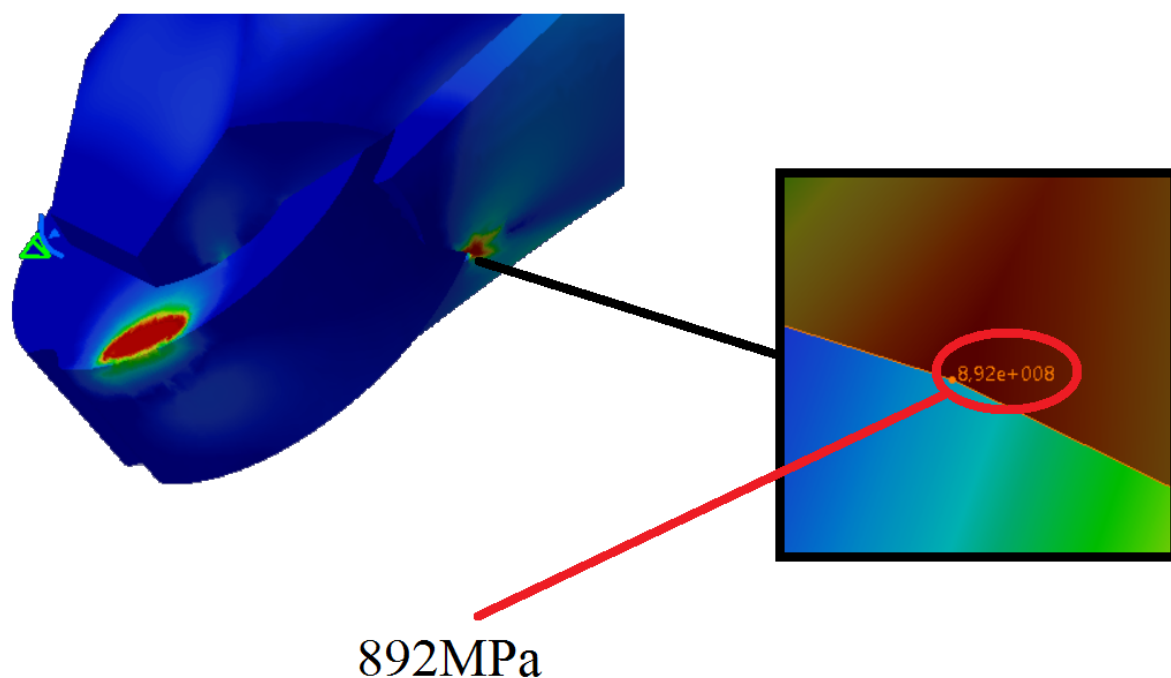
Obrázek 50: Spektrální analýza prvního výpočtu

Na obrázku 50 je vidět spektrální analýza prvního výpočtu metodou konečných prvků MKP. Nastavení mapy barev v pravé části obrázku je upraveno tak, aby červená místa znázorňovala místa s napětím větším než 200 MPa.

Červené místo znázorněné na destičce nám ukazuje část VBD, kde byla aplikována zatěžující síla, čímž zde vzniká napětí.

Kritická místa A, C, D, která jsou znázorněna na obrázku 46 byla úpravou před prvním výpočtem vyřešena a s těmito místy již není dále počítáno jako s kritickými.

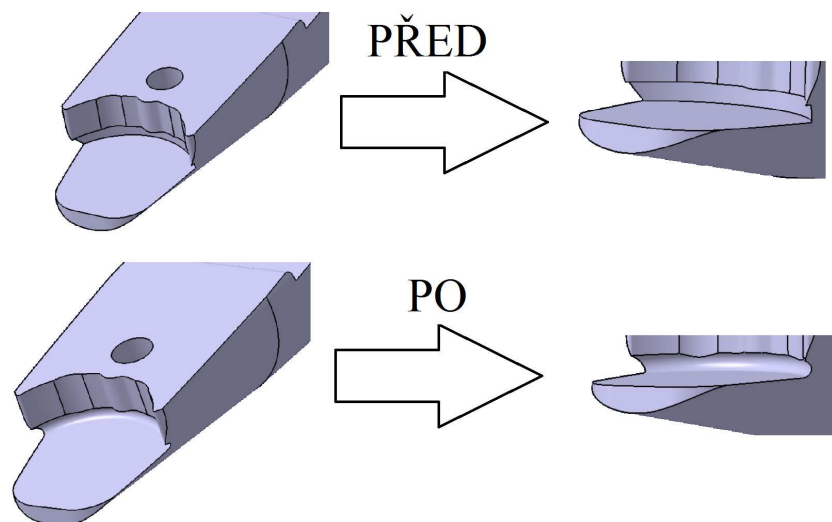
Problémové místo B je nejkritičtější místem z celého řešení návrhu. Před prvním výpočtem došlo k úpravě tohoto místa s tím, že bylo předpokládáno s dvěma výpočty. Dva výpočty byly navrženy právě z důvodu vylepšení tohoto místa. Na obrázku 51 je znázorněno maximální zjištěné napětí v nejvíce zatíženém elementu sítě. Jedná se tedy o lokální zjištěné napětí.



Obrázek 51: Maximální zjištěné bodové napětí při prvním výpočtu

Maximální lokální napětí v bodu nejvíce zatíženého elementu řešení bylo zjištěno 892 MPa. Toto napětí nevyhovuje zvolenému materiálu, a proto je nutné navrhnout návrh úpravy daného místa. Před prvním výpočtem bylo toto místo upravováno. Před vytvořením první analýzy bylo počítáno s analýzou číslo dvě pro další vylepšení tohoto místa.

Akumulátory maximálního napětí těla nástroje jsou rohy vybrání dna lůžka, a proto před druhým výpočtem byly tyto rohy zaobleny (úprava je znázorněna na obrázku 52). (Pozn. Na obrázku není znázorněno sražení díry pro závit, jelikož pro výpočtový model bylo toto sražení odstraněno pro zjednodušení výpočtového modelu).



Obrázek 52: Úprava dna lůžka před druhým výpočtem

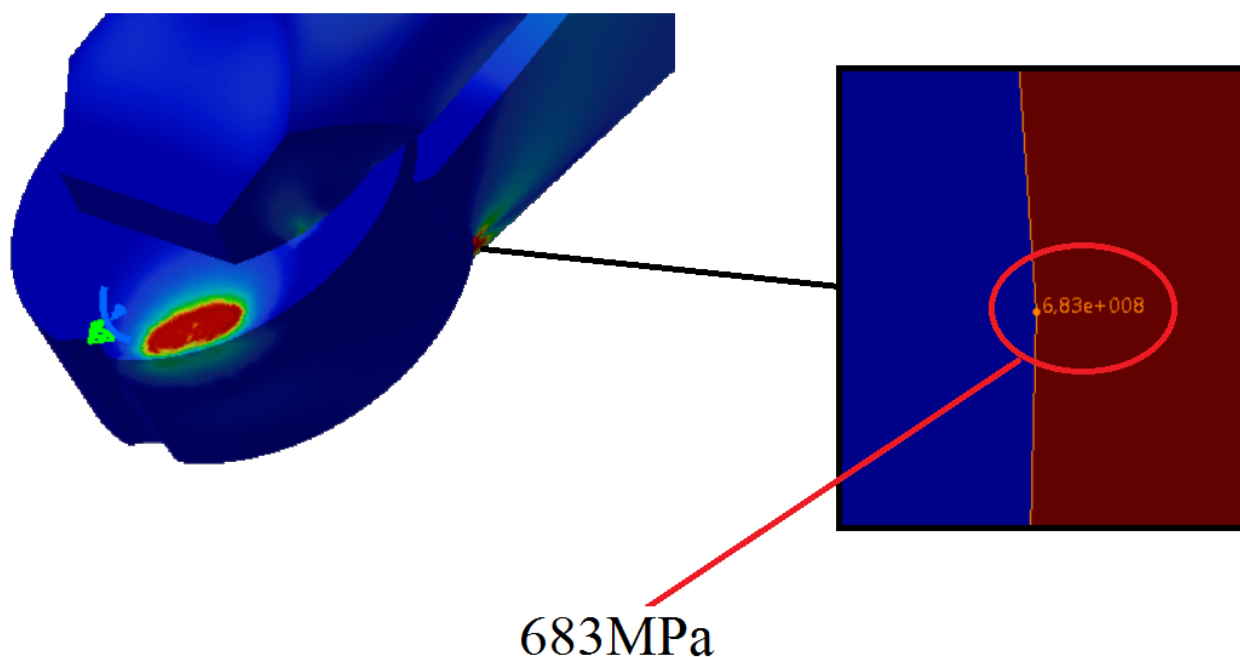
4.3.4 Druhá analýza

Před druhou analýzou bylo nezbytné modifikovat opět odlehčení dna lůžka nástroje. Pro odstranění vrubu byly rohy odlehčení dna lůžka zaobleny pro zlepšení tuhosti daného místa a zmenšení zjištěného lokálního napětí, které nespĺňuje požadavky dané zvoleným materiálem těla nástroje.

Pro druhý výpočet byl zvolen téměř stejný výpočtový model jako u prvního výpočtu. Model byl pouze modifikován o úpravu dna lůžka a znovu zasít'ován.

Pro výpočet byly taktéž použity stejné počáteční podmínky jako u prvního výpočtu.

Při druhé analýze nebylo provedeno vyhodnocení spektrální analýzy celého řešení, jelikož u druhého výpočtu je sledováno pouze napětí v místě vybrání dna lůžka, které bylo modifikováno.



Obrázek 53: Maximální zjištěné bodové napětí při druhém výpočtu

Na obrázku 53 je vidět detail maximálního zjištěného lokálního napětí řešeného návrhu. Vlivem úpravy rohů vybrání dna lůžka destičky se maximální zjištěné bodové napětí zmenšilo z 892 MPa na 683 MPa. Jedná se o napětí v bodě nástroje.

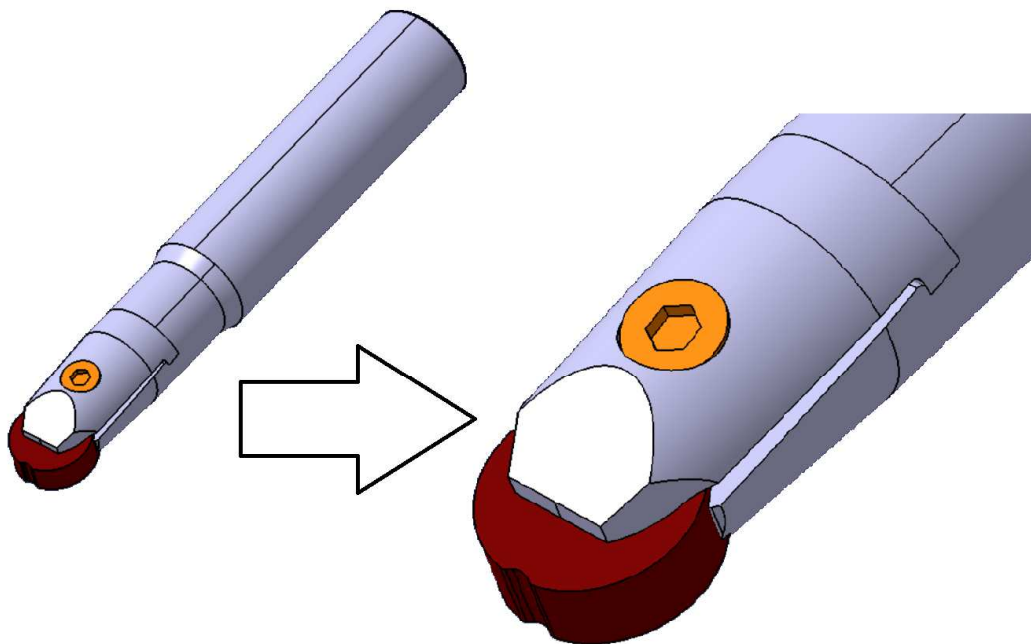
Při vyhodnocení maximálního napětí součásti by se měla uvažovat průměrná hodnota všech bodů elementu. Minimalizuje se tak výpočtová chyba sítě. Výsledné zjištěné napětí by se nám zmenšilo. Vyhodnocení pomocí průměrných hodnot elementů nebylo vytvořeno, jelikož zjištěné bodové napětí 683 MPa již vyhovuje námi zvolenému materiálu 16 343.7 .

Z výsledků analýzy lze usoudit, že výsledné napětí v nástroji při obrábění bude do 683 MPa. Výsledné napětí bude záviset na materiálu, který budeme nástrojem obrábět.

5 Technické zhodnocení navržené varianty

Na obrázku 54 je finální návrh kulové frézy pro vyměnitelnou keramickou břitovou destičku s negativní geometrií břitu.

Jednou z hlavních předností daného řešení kulové frézy je její vícenásobné použití díky kruhové vyměnitelné břitové destičce a negativní geometrii břitu destičky. Negativní geometrie břitu má za následek pevnější nástroj avšak na úkor zvyšujícího se tření na čele hřbetu a horšího odvodu třísek z místa řezu.



Obrázek 54: Finální návrh nástroje

5.1 Technické hodnocení návrhu z jednotlivých hledisek

Technické hodnocení z hlediska funkčnosti návrhu nástroje

Jedná se o nástroj s negativních geometrií pro vyměnitelnou břitovou destičku o průměru 12,7 mm a tloušťky 4,76 mm z řezné keramiky z označením IW7. Pro vytvoření úhlu hřbetu byla destička v lůžku vykloněna o úhel 7° v ortogonální rovině.

Pro upnutí destičky byla zvolena upínka, která je upnuta do nástroje pomocí upínacího šroubu. Upínací síla šroubu je navržena tak, aby byla vyměnitelná břitová destička neustále zatlačována do lůžka nástroje. Řešení upnutí vyměnitelné břitové destičky pomocí upínky je nejvýhodnější řešení z hlediska zajištění správně funkčnosti upnutí.

Součástí návrhu je úprava zadané vyměnitelné břitové destičky, která slouží pro zamezení případného vydrolování řezné keramiky vlivem nulové rychlosti v ose nástroje a k navedení destičky do lůžka nástroje pro rychlejší výměnu nástroje.

Pro správné usednutí destičky do lůžka nástroje byli navrženy úpravy stěn a dna lůžka. Návrh řešení má omezující parametr způsobený samotnými parametry zadání. Tento omezující parametr společně s jeho řešením je blíže v kapitole 4. 2. 9. Nástroj je určen pro kopírovací frézování, které lze řadit mezi dokončovací operace.

Technické hodnocení z hlediska tuhosti upnutí

Pro zvýšení tuhosti upnutí bylo v průběhu úprav modelu při analýze pomocí metody konečných prvků zvětšeno boční vedení vyměnitelné břitové destičky. Samotná upínka, která zajišťuje upínací sílu držící destičku v lůžku nástroje, je navržena za účelem vytvoření tuhého spojení, bez možného vychýlení upínky z místa upnutí. Upínka má funkční zámek pro navedení upínky do správného upínacího místa. Vzniklé napětí, které se vyskytují na upínce lze řadit mezi nekritické. Po zvýšení tuhosti řešení byly použity na návrh řešení materiály se zvýšenou pevností.

Technické hodnocení z hlediska tvaru

Jedná se o rotační nástroj, ve kterém je uložena vyměnitelná břitová destička. Jelikož je destička vykloněna o 7° , nástroj má tak posunutě těžiště vyměnitelné břitové destičky mimo osu nástroje. Tento fakt je nevýhodou daného řešení návrhu frézovacího nástroje, je však způsoben samotnou problematikou řešení, která zatěžuje samotné splnění vstupního zadání. Tvar upínky je v souladu s designem nástroje a tak při upnutí upínky je tvar nástroje upínkou kopírován.

Technické hodnocení z hlediska navržených materiálů

Materiály pro tělo nástroje, upínku a šroub upínky byly vybrány na základě zjištěných materiálových požadavků pro jednotlivé části sestavy výsledného návrhu nástroje. Pro upínku a tělo nástroje byl zvolen stejný materiál, jelikož se z praktických důvodů nedoporučuje materiály těchto částí nástroje kombinovat. Pro materiál šroubu upínky byl zvolen vysokopevnostní materiál třídy 10 K.

6 Závěr

Cílem této práce byl návrh frézovacího nástroje pro řeznou keramiku. Předmětem návrhu byla zadána kulová fréza pro kruhovou vyměnitelnou břitovou destičku z řezné keramiky o průměru 12,7 mm a tloušťky 4,76 mm. Všechny návrhy a řešení v této práci byly vytvořeny v programu Catia V5R20.

Průběžně bylo zapotřebí vyřešit několik problémů, které vyplývaly ze samotného zadání. Pro návrh byla zadána vyměnitelná břitová destička s negativní geometrií, proto bylo zapotřebí vyklonit destičku do lůžka nástroje pro vytvoření úhlu hřbetu. Kulová fréza je rotační nástroj, čímž v ose rotace vzniká nulová řezná rychlost. Tento problém by vedl k vylamování řezné keramiky v místě osy nástroje. Pro návrh nástroje byla zvolena úprava destičky, která současně slouží k navedení destičky do lůžka nástroje. Hlavním problémem řešení diplomové práce bylo navržení upnutí vyměnitelné břitové destičky, která je z plného materiálu.

V průběhu řešení byly navrženy tři varianty návrhu nástroje. První dvě varianty upnutí nástroje byly navrženy pomocí upínky. Hlavním rozdílem mezi těmito variantami návrhu je řešení zámku upínky, který je v první variantě veden kolmo na osu a ve druhé variantě rovnoběžně s osou. Třetí varianta návrhu je naprosto odlišná od dvou předchozích. Nástroj je v polovině těla dělen. První část je upínací do vřetena stroje, druhá část slouží pro upnutí vyměnitelné břitové destičky. Vyměnitelná břitová destička je držena pomocí svěrného spoje, který je vytvořen pomocí stahování svěrné matice. Matice je vlivem rotační síly neustále dotahována.

Pro detailnější návrh byla vybrána varianta řešení číslo 1. Varianta řešení číslo 3 nebyla vybrána z důvodu obtížného simulování dynamických účinků na upnutí vyměnitelné břitové destičky. Varianta řešení číslo 2 je variantě řešení číslo 1 velmi podobná, avšak návrh číslo 1 má řešení zámku upínky tužší než návrh číslo 2.

Pro detailnější návrh vybrané varianty řešení byly určeny zatěžující výpočtové síly. Při výsledném návrhu byl pro tělo nástroje a upínku navržen materiál 16343.7 a pro upínací šroub materiál 15230.7. Vybraný návrh řešení nástroje byl podroben dvěma analýzám výpočtu pomocí metody konečných prvků MKP. Účelem aplikování této metody bylo odhalení kritických míst řešení a jejich optimalizace.

Byl proveden návrh frézovacího nástroje pro řeznou keramiku pro zadanou vyměnitelnou břitovou destičku. Dalším krokem ve vývoji nástroje je výroba prototypu a testování v praxi. Tento krok však není náplní této práce a je předmětem dalšího zkoumání do budoucna.

Použitá literatura

- [1] *Frézování* ; [cit. 2014-23-11] online dostupný z:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Fr%C3%A9zov%C3%A1n%C3%AD>
- [2] *Druhy fréz* ; [cit. 2014-23-11] online dostupný z:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Fr%C3%A9za>
- [3] *Katalog Rotační nástroje - Frézování SANDVIK COROMANT*; [cit. 2014-23-11] online dostupný z:
http://www.sandvik.coromant.com/_layouts/15/tibp/downloadshandler.ashx?url=http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/catalogues/cs-cz/rotating/rot_d.pdf&fileName=Rota%C4%8Dn%C3%AD%20n%C3%A1stroje%20-%20Fr%C3%A9zov%C3%A1n%C3%AD
- [4] *Vyměnitelné břitové destičky*; [cit. 2014-07-12] online dostupný z:
http://utopm.fsid.cvut.cz/podklady/ON/2013_3_Vymenitelne_britove_desticky.pdf
- [5] *Příručka obrábění*, kniha pro praktiky, *Sandvik Coromant-technická redakce*. První české vydání 1997, ISBN 91-97 22 99-4-6
- [6] *Obrábění řeznou keramikou*; [cit. 2014-12-12] online dostupný z:
<http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/brochures/cs-cz/c-2929-61.pdf>
- [7] *Tvary VBD dle ISO*; [cit. 2014-28-12] online dostupný z:
https://katalog.mav.cz/data/pramet2/files/system_znaceni_vbd.pdf
- [8] *Řezné materiály*; [cit. 2014-29-12] online dostupný z:
http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf
- [9] *Řezná keramika*; [cit. 2015-05-01] online dostupný z:
http://www.ateam.zcu.cz/download/Rezna-keramika-07_08.pdf
- [10] *Rychlořezné oceli*; [cit. 2015-05-01] online dostupný z:
<http://www.tumlikovo.cz/druhy-rychlouzných-oceli-hss/>
- [11] *Řezná keramika-vlastnosti, využití*; [cit. 2015-06-01] online dostupný z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=52232
- [12] *Řezná keramika-Iscar*; [cit. 2015-07-01] online dostupný z:
http://www.iscar.com/Ecat/WZ/iscar_grade_chart.pdf
- [13] *Strojírenská technologie 4, Návrhy nástrojů, přípravků a měřidel, Zásady montáže*; J. ŘASA, V. HANĚK, J.KAFKA, *Scientia*. 2003, ISBN 80-7183-284-7
- [14] *Vlákna z karbidu křemíku* ; [cit. 2015-02-02] online dostupný z:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Vl%C3%A1kna_z_karbidu_k%C5%99em%C3%ADku

- [15] *Upínání pomocí kleštín* ; [cit. 2015-07-02] online dostupný z:
<http://www.nastroje.cz/upinani>
- [16] *Hydraulické a tepelné upínače* ; [cit. 2015-07-02] online dostupný z:
http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [17] *Hydraulický upínač Schunk-TENDO*; [cit. 2015-07-02] online dostupný z:
http://www.winter-servis.cz/index.php?page=schunk/n_tendo
- [18] *Kulové frézy s vyměnitelnými elementy od firmy Iscar-KATALOG*; [cit. 2015-07-02]
online dostupný z:
<http://www.iscar.com/eCatalog/Products.aspx?mapp=ML&app=71>
- [19] *Kulové frézy s vyměnitelnými elementy od firmy PRAMET-KATALOG*;
[cit. 2015-07-02] online dostupný z:
<http://www.pramet.com/cz/ke-stazeni.html>
- [20] *Řezný materiál IW 7* ; [cit. 2015-07-02] online dostupný z:
<http://www.iscar.cz/Media/pdf/NovinkyISCAR.pdf>
- [21] *Materiál 19573* ; [cit. 2015-07-02] online dostupný z:
<http://www.nastrojove-oceli.com/tu/1.2379.pdf>
- [22] *Strojírenské tabulky, Pomocná učebnice pro školy technického zaměření*;
J. LEINVEBER, P. VÁVRA, *Albra*. 2003, ISBN 80-86490-74-2
- [23] *Materiál 15230* ; [cit. 2015-29-03] online dostupný z:
<http://www.jkz.cz/produkty/ocel-k-zuslechtovani-15-230>
- [24] *Materiál 16343* ; [cit. 2015-07-04] online dostupný z:
http://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10083/MOP_34CrNiMo6.pdf
- [25] *Katalogový utahovací moment* ; [cit. 2015-15-04] online dostupný z:
<http://www.pramet.cz/cz/ke-stazeni.html>

Seznam obrázků

Obrázek 1: Sousledné a nesousledné frézování	12
Obrázek 2: Kulová fréza od firmy SANDVIK COROMANT s popisem základních částí nástroje[3].....	13
Obrázek 3: Vyměnitelná břitová destička s pozitivní a zvláště pozitivní geometrií [5]	14
Obrázek 4: Vyměnitelná břitová destička s negativní geometrií [5].....	15
Obrázek 5: Základní tvary destiček dle ISO [7].....	16
Obrázek 6: Diagram srovnání jednotlivých řezných materiálů [9]	18
Obrázek 7: Rozdělení řezné keramiky[9].....	20
Obrázek 8: Průřez kompozitem s matricí a vyztužujícími vlákny z SiC (zvětšení 1000x) [14]	21
Obrázek 9: Rozsah použití řezné keramiky [9].....	22
Obrázek 10: Upnutí VBD ze slinutého karbidu pomocí centrálního šroubu [3].....	24
Obrázek 11: Příklad upínání VBD pomocí upínky a klínu [13]	24
Obrázek 12: Příklad vyvození upínací síly F	25
Obrázek 13: Konstrukční prvky upínky od firmy SANDVIK COROMANT	26
Obrázek 14: Tělo kulové frézy s popisem základních částí	27
Obrázek 15: Namáhání těla nástroje na ohyb [13]	27
Obrázek 16: Namáhání těla nástroje na krut [13]	28
Obrázek 17: Tvary stopek kulové frézy	28
Obrázek 18: Hydraulický upínač Schunk – TENDO [17]	29
Obrázek 19: Tepelný upínač [16].....	30
Obrázek 20: Typy kulových fréz z vyměnitelnými elementy od firmy ISCAR [20].....	31
Obrázek 21: Typy kulových fréz s vyměnitelnými elementy od firmy SANDVIK COROMANT[3]	31
Obrázek 22: Typy kulových fréz s vyměnitelnými elementy od firmy PRAMET [19]	31
Obrázek 23: Rozměry zadané VBD od firmy ISCAR	32
Obrázek 24: Porovnání řezných podmínek jednotlivé řezné keramiky od firmy ISCAR [20]	32
Obrázek 25: Geometrie břitu VBD uložené v těle nástroje v ortogonální rovině.....	33
Obrázek 26: Úprava VBD	34
Obrázek 27: Detail úpravy VBD	34
Obrázek 28: Úpravy lůžka k navedení VBD.....	35
Obrázek 29: Návrh upínky pro variantu č. 1	36
Obrázek 30: Lůžko nástroje, upínání upínky pro variantu řešení č. 1	37
Obrázek 31: Sestava nástroje pro variantu řešení č. 1.....	37
Obrázek 32: Návrh upínky pro variantu č. 2	38
Obrázek 33: Lůžko nástroje, upínání upínky pro variantu řešení č. 2	39
Obrázek 34: Sestava nástroje pro variantu řešení č. 2.....	39
Obrázek 35: Návrh upnutí pro variantu řešení č. 3	40
Obrázek 36: Lůžková část nástroje pro variantu řešení č. 3.....	41
Obrázek 37: Sestava nástroje pro variantu řešení č. 3.....	41
Obrázek 38: Soustava pro měření řezných sil	43
Obrázek 39: Obrázek ustavení vzorku do svěráku s orientací os.....	44
Obrázek 40: Rovnováha sil působících na upínku	45
Obrázek 41: Rozklad síly ve šroubu F_{ξ}	46
Obrázek 42: Použité materiály jednotlivých částí sestavy nástroje	49
Obrázek 43: Omezující parametr a jeho řešení	50
Obrázek 44: Označení středícího důlku[21].....	51

Obrázek 45: Vyložení nástroje	51
Obrázek 46: Problematická místa řešení, návrh řešení	52
Obrázek 47: Změna bočního vedení VBD	53
Obrázek 48: Určení zatěžující síly F_v	54
Obrázek 49: Výpočtový model	54
Obrázek 50: Spektrální analýza prvního výpočtu	55
Obrázek 51: Maximální zjištěné bodové napětí při prvním výpočtu	56
Obrázek 52: Úprava dna lůžka před druhým výpočtem	56
Obrázek 53: Maximální zjištěné bodové napětí při druhém výpočtu	57
Obrázek 54: Finální návrh nástroje	58

Seznam tabulek

Tabulka 1: Význam číslování VBD podle ISO	13
Tabulka 2: Základní výhody a nevýhody VBD s pozitivní geometrií	14
Tabulka 3: Základní výhody a nevýhody VBD s negativní geometrií	15
Tabulka 4: Základní vlastnosti řezných materiálů [8]	17
Tabulka 5: Srovnání vybraných vlastností řezných materiálů [9]	18
Tabulka 6: Vlastnosti vybraných řezných keramik [11]	21
Tabulka 7: Velikosti jednotlivých úhlů v ortogonální rovině	33
Tabulka 8: Varianty řešení návrhu kulové frézy	42
Tabulka 9: Hodnocení variant řešení	42
Tabulka 10: Řezné podmínky při experimentu	44
Tabulka 11: Zjištěné maximální síly v jednotlivých složkách při měření	44
Tabulka 12: Nejvyšší hodnoty sil zjištěné v jednotlivých souřadných osách	44
Tabulka 13: Chemické složení materiálu 15230 [23]	47
Tabulka 14: Chemické složení materiálu 16343 [20]	49
Tabulka 15: Mechanické vlastnosti materiálu 16343 v zušlechťeném stavu [24]	49

Seznam příloh

Příloha č. 1	VÝKRES: TĚLO NÁSTROJE
Příloha č. 2	VÝKRES: UPÍNKA
Příloha č. 3	VÝKRES: KULOVÁ FRÉZA